

Feststofftransport und Geschwindigkeitsverteilung in Raugerinnen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für
Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Katinka Koll

aus Hamburg

Tag der mündlichen Prüfung: 12.Juli 2002

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Dittrich
Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Franz Nestmann
Prof. Dr.-Ing. Helmut Scheuerlein

Karlsruhe 2002

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH) im Rahmen des EU-Projekts Eroslope II.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Dittrich für die intensive fachliche Unterstützung und Betreuung. Seine stete Diskussionsbereitschaft trug wesentlich zu meiner Entwicklung in der wissenschaftlichen Arbeit bei. Nicht zuletzt möchte ich mich für die Übernahme des Hauptreferats bedanken.

Dem Institutsleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Franz Nestmann möchte ich für die Übernahme des Korreferats und vor allem für die Ermöglichung dieser Arbeit durch die gewährten Freiheiten und die bereit gestellten Mittel herzlich danken.

Herrn Prof. DI Dr. techn. Helmut Scheuerlein möchte ich meinen herzlichen Dank für das langjährige Interesse und die Übernahme des zweiten Korreferates aussprechen.

Den Kollegen des Projekts Eroslope II, vor allem der Berliner Gruppe um Prof. Dr. Peter Ergenzinger und Dr. Peter Obenauf, danke ich für die Diskussionen und Anregungen.

Besonders herzlich danke ich Herrn Dr.-Ing. Jochen Aberle für die engagierte Mitarbeit am Projekt Eroslope II und die vielen fachlichen Diskussionen, die auch nach seinem Weggang vom Institut jederzeit möglich waren.

Herrn Dr.-Ing. Thorsten Stößer danke ich herzlich für die hilfreichen Diskussionen besonders während der letzten Monate. Des weiteren gilt mein Dank Herrn Dr. Vladimir Nikora, der mir einen Aufenthalt in Neuseeland ermöglichte und in vielen Gesprächen wertvolle Hinweise gab. Ebenfalls möchte ich Frau Dr. rer.nat Charlotte Kämpf meinen Dank für ihre Unterstützung aussprechen sowie Herrn Dr.-Ing. Sebastian Palt und allen Kollegen, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Meiner Familie und Herrn cand.-Ing. Oliver Kern möchte ich, ebenso wie allen Freunden, für ihre Geduld, das Verständnis und die Unterstützung ganz besonders Dankeschön sagen.

Karlsruhe, im Juni 2002

Katinka Koll

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit präsentiert neue Erkenntnisse zu Sohlenstabilität und Geschiebetransport und zum Geschwindigkeitsfeld über rauen Gewässersohlen.

Die Auswirkung von eingetragem Geschiebe auf eine durch eine statische Deckschicht stabilisierte Gewässersohle wurde erstmalig anhand von Laborversuchen untersucht, in denen systematisch die Zugaberate, -dauer und -fraktion variiert wurden. Die Einfärbung des Zugabematerials ermöglichte dabei die separate Analyse von erodiertem Sohlenmaterial und transportiertem Zugabematerial. Aufgrund des gewählten Gefällebereichs und der Kornmischung des Sohlenmaterials wies die Gewässersohle neben der statischen Deckschicht ein ausgeprägtes Step-Pool-System auf.

Die Untersuchungen zeigen, dass eine vorhandene Deckschicht nicht durch den Transport von externem Geschiebe geschützt, sondern zusätzlich beansprucht wird. Dies erfolgt lokal aufgrund von Änderungen des Strömungsfeldes, solange der zur Bewegung des Zugabematerials erforderliche Durchfluss nicht erreicht wird. Darüber hinaus verändert sich die Rauheit der Sohle und auch die Neigung mit anhaltendem Geschiebeeintrag. Ist der herrschende Durchfluss größer als der kritische, bewirkt eine durch die Zugabe erhöhte Fließgeschwindigkeit höhere Impulse der Partikel und damit eine zusätzliche Destabilisierung von Sohlenmaterial. Das Zurückhalten von eingetragem Geschiebe einerseits und die Mobilisierung von Sohlenmaterial andererseits führen zu starken Schwankungen in den Transportraten und der Kornzusammensetzung des erodierten Materials. Mit andauerndem Eintrag ändert sich dabei der Mittelwert der Schwankungen. Ein mobiles Geschiebegleichgewicht, wie es in den meisten Transportformeln vorausgesetzt wird, liegt nicht vor, ist aber für eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung notwendig. Dies konnte ebenso nachgewiesen werden wie die Schwierigkeit, ausgehend von der statischen Deckschicht die im mobilen Gleichgewicht vorliegenden Randbedingungen abzuschätzen.

Zur wesentlichen Verbesserung der Berechnungsergebnisse in Gebirgsbächen reicht es also nicht aus, vorhandene Geschiebetransportformeln in numerische Modelle einzuarbeiten, da die meisten Formeln auf idealisierten Randbedingungen basieren und mit der Sohlenrauheit und der Kornbewegung veränderliche Strömungsbedingungen nicht berücksichtigen. Statt dessen ist zunächst die Erweiterung der Kenntnisse des Strömungsfeldes in Abhängigkeit von der Sohlenrauheit und vom Vorhandensein bewegter Partikel erforderlich. In einem ersten Schritt wurde deshalb das Geschwindigkeitsfeld in Laborversuchen über ebenen, rauen Sohlen insbesondere bei geringen relativen Überdeckungen untersucht.

Als zentrales Problem der Untersuchung rauer Sohlen wurde die Lage des Bezugsniveaus des logarithmischen Geschwindigkeitsprofils erkannt, da es wesentliche Parameter wie das hydraulische Rauheitsmaß, die Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit und die Steigung des Geschwindigkeitsprofils maßgeblich beeinflusst, die letztlich für die Berechnung des Fließwiderstands, der Sohlenstabilität und des Geschiebetransports erforderlich sind. Dies führte zu einer neuen Definition des vertikalen Versatzes d , die darüber hinaus eine von der bisherigen Methode abweichende Bestimmung der hydraulischen Rauheit, der Integrationskonstanten des logarithmischen Geschwindigkeitsgesetzes und der von Kármán Konstante beinhaltet. Der vertikale Versatz d wird nicht länger mit dem Ziel bestimmt, die Steigung des

Geschwindigkeitsprofils einem vorgegebenen Wert ($\kappa \approx 0,4$) anzupassen. Statt dessen wird als Bezugsniveau diejenige Höhe verstanden, in der die Mischungsweglänge des logarithmischen Bereichs Null ist. Die ausgewerteten Daten bestätigen die Abhängigkeit der von Kármán Konstante von der Wassertiefe, im besonderen von der relativen Überdeckung h/k , und von der Unregelmäßigkeit der Rauheitsoberfläche.

Als neues Rauheitsmaß konnte die Grenze zwischen der Rauheitsschicht, in der das vertikale Geschwindigkeitsprofil linear verläuft (d.h. die rauheitsinduzierte Wirbelviskosität ist über die Tiefe konstant), und der logarithmischen Schicht, in der das Geschwindigkeitsprofil logarithmisch verteilt ist, identifiziert werden. Der Vorteil dieses Maßes gegenüber der absoluten Rauheitshöhe liegt darin, dass es zum einen unabhängig von einem definierten Bezugsniveau ist und zum anderen die genaue Bestimmung der Rauheitsoberkante nicht erforderlich ist. Somit kann die Rauheit sowohl durchlässiger als auch sehr unregelmäßiger Sohlen beschrieben werden.

Die Versuchsergebnisse deuten darauf hin, dass die Parameter der Rauheitsschicht einzig eine Funktion der Rauheitsgeometrie und somit unabhängig von Eigenschaften der Strömung sind. Diese Ergebnisse könnten es ermöglichen, die über rauen Sohlen praktisch nicht vorhandene viskose Grenzschicht als Lieferanten der für numerische Programme erforderlichen Randbedingungen durch die erste forminduzierte Unterschicht zu ersetzen. Zuvor sind jedoch weiterführende Untersuchungen schematisierter sowie naturnaher Rauheitsstrukturen erforderlich, wobei die Durchlässigkeit des Sohlenkörpers zu berücksichtigen ist. Auch die teilweise recht große Streubreite in den Ergebnissen verdeutlicht die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen, in denen das Strömungsfeld nicht nur zeitlich, sondern auch räumlich hoch aufgelöst zu erfassen ist. Mit der vorgestellten doppelten Mittelung der Navier-Stokes-Gleichungen ist dann eine Methode verfügbar, die eine Trennung in turbulente und rauheitsinduzierte Schwankungen ermöglicht. Vor allem in der Auswertung der statistischen Parameter liegt ein großes Potential zur Beschreibung der hydraulischen Wirkung sehr unregelmäßiger Sohlen.

Abstract

The study presents new results of investigations of bed-load transport and the flow field over rough surfaces.

A series of laboratory experiments were carried out to investigate the influence of bed-load transport on the stability of static armour layers with steep slopes (8-10 %). The bed morphology was characterised by step-pool systems, which were formed by water worked self stabilization (bed material $1 \text{ mm} < d_k < 64 \text{ mm}$). Feeding rate, duration, and material varied systematically and colourization of the feeding material allowed for separate analysis of eroded bed material and transported feeding material.

It is discussed if additional impulses acting on a surface due to transport of material could lead to a destruction of the armour layer, or, since a part of the stream power is used to mobilize the material, if bed load material shelters the armour layer. The results show that bed material, which is immobile under clear water conditions is re-mobilized when bed load occurs in an armoured river section. The feeding material is stored in gaps and pools of the surface, which results in local changes of the flow field and thus in the mobilization of bed material. Furthermore, the roughness and the slope of the surface is changed, which results in increased flow velocities. If the discharge is larger than the critical discharge of the feeding material the increase in flow velocity is even higher, due to large impulses acting on the bed surface. Transport rates and grain-size distribution of the bed-load are fluctuating due to storage of feeding material and mobilization of bed material and are a function of feeding material and feeding duration. Therefore, a mobile equilibrium, assumed in many transport formulas, does not exist, but is a rather academic assumption.

Thus, incorporating transport formulas in numerical models will not advance knowledge of sediment transport in steep streams. An abundance of formulae was developed under idealized conditions. Changes of the flow field due to variable roughnesses and moving particles were not considered. Hence it is necessary to enhance the knowledge of the influence of bed roughness and moving particles on the flow field in order to develop robust sediment transport models. For this purpose, the velocity field over flat, rough surfaces considering low relative submergences was investigated in a series of additional laboratory experiments.

The definition of the origin of the vertical velocity profile was identified as the most important parameter for characterizing the flow field over rough surfaces. All basic parameters for the determination of flow resistance, bed stability and finally bed-load transport, such as the hydraulic roughness, the friction velocity, and the shape of the vertical velocity profile depend on the location of the origin.

A new definition of the zero displacement height d is introduced, resulting in a new method for the determination of hydraulic roughness, the constant of integration of the logarithmic law as well as the variability of the von Kármán constant κ . Instead of fitting the displacement height to a fixed value of κ , d is assumed to be the height in which the mixing length of the logarithmic layer l_L is zero. The new method as well as the dependence of κ on relative submergence and irregularity of the bed surface, as reported in the literature, could be confirmed by the analyses.

The boundary z_R between the roughness layer and the logarithmic layer was identified as a new measure of the roughness. z_R allows for a description of the roughness of permeable surfaces as well as very irregular roughnesses, since it is independent of a defined reference level and the exact location of the top of roughness elements. The results indicate that the roughness layer is only a function of the roughness geometry and independent of characteristics of the flow field. The linearity of the velocity distribution in the roughness layer could also be confirmed, which means that the roughness induced eddy viscosity is constant over the depth.

The presented results may serve as a basis to replace the viscous layer as boundary condition in numerical models. This layer does not exist over rough surfaces and the presented results indicate that it can be replaced by the first form induced sublayer. However, further investigations of the flow field over permeable beds with artificial and natural roughnesses are necessary for clarification of this point. Furthermore, the results indicate the applicability of the doubled averaged Navier-Stokes equations (temporal and spatial). The method is described and it requires the determination of the flow field with a high resolution in both, time and space. The advantage of this method is the precise distinction in turbulent and roughness induced velocity fluctuations. Especially the analysis of statistical parameters has a high potential to determine the hydraulic effect of irregular rough surfaces as well as of the influence of vegetation.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	XI
Verzeichnis der Anhänge	XII
1 Einleitung	1
2 Wechselwirkung Sohlenstabilität - Geschiebetransport	5
2.1 Sohlenstabilität	7
2.1.1 Der Shields-Ansatz	7
2.1.2 Einfluss der Liftkraft.....	9
2.1.3 Einfluss der Kornform.....	10
2.1.4 Einfluss der Exponiertheit - Kornmischungen	11
2.1.5 Statische Deckschichten	15
2.1.6 Einfluss der Neigung und der Sohlenstruktur	19
2.1.7 Einfluss der relativen Überdeckung	22
2.1.8 Einfluss von Geschiebe	23
2.2 Geschiebetransport	27
2.2.1 Mobile Deckschichten	27
2.2.2 Mittlerer Geschiebetransport	30
2.2.3 Fraktionsweiser Geschiebetransport	32
2.3 Ableitung offener Fragen	36
2.4 Experimente	37
2.4.1 Versuchsaufbau	37
2.4.2 Versuchsablauf	38
2.4.3 Versuchsparameter	40
2.4.4 Reproduzierbarkeit der Ergebnisse	41
2.5 Ergebnisse.....	45
2.5.1 Transportraten.....	45
2.5.2 Transportierte Mengen	56
2.5.3 Kornzusammensetzung des erodierten Sohlenmaterials.....	61
2.5.4 Mittlere Fließgeschwindigkeit	63
2.5.5 Änderung der Parameter der statischen Deckschichten	67
2.5.6 Geschiebetransportberechnung	68
2.6 Zusammenführende Diskussion der Ergebnisse	73

3	Turbulentes Geschwindigkeitsfeld über rauen Sohlen.....	79
3.1	Grundlegende Gleichungen der turbulenten Strömung	81
3.1.1	Navier-Stokes-Gleichungen.....	81
3.1.2	Reynolds-Gleichungen	81
3.1.3	Offene Gerinneströmung	84
3.1.4	Doppelte Mittelung der Navier-Stokes-Gleichungen	86
3.2	Schichten des vertikalen Geschwindigkeitsfeldes	89
3.2.1	Porenraum	89
3.2.2	Viskose Grenzschicht.....	90
3.2.3	Rauheitsschicht.....	91
3.2.3.1	Rauheitsdichte c_K	94
3.2.4	Logarithmische Schicht	96
3.2.4.1	Integrationskonstante B und äquivalente Sandrauheit k_S	99
3.2.4.2	Vertikaler Versatz d	102
3.2.4.3	von Kármán Konstante κ	104
3.2.4.4	Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit u_*	110
3.2.5	Außenschicht	111
3.3	Neue Methode zur Bestimmung der Parameter des wandnahen Geschwindigkeitsfeldes.....	113
3.4	Datengrundlage	117
3.4.1	Untersuchte Sohlenrauheiten	120
3.4.1.1	Künstliche Rauheiten.....	121
3.4.1.2	Natürliche Rauheiten	121
3.4.2	Versuchsparameter	122
3.5	Datenanalyse.....	125
3.5.1	Parameter der zweiten forminduzierten Unterschicht	127
3.5.2	Parameter der ersten forminduzierten Unterschicht.....	129
3.5.3	Parameter der logarithmischen Schicht.....	133
3.6	Resümee zum turbulenten Geschwindigkeitsfeld über rauen Sohlen.....	139
4	Zusammenfassung und Ausblick	141
	Literaturverzeichnis	145
	Anhänge	

Symbolverzeichnis

a_s	[-]	Parameter zur Berücksichtigung der Kornlagerung nach SCHÖBERL (1979)
A	[-]	Integrationskonstante für glatte Sohlen
A_{\perp}	[m ²]	senkrecht angeströmte Fläche eines Elements
A_0	[m ²]	Einheitsfläche
A_f	[m ²]	vom Fluid eingenommene Fläche
A_F		Sieblinie der Fullerkurve
A_G	[m ²]	Grundfläche eines Elements
A_R	[-]	Rauheitsfunktion nach NIKORA ET AL. (2001)
A_X		Sieblinie der Ausgangsmischung (des Unterschichtmaterials)
b		Regressionskoeffizient
b_L		Regressionskoeffizient der logarithmischen Schicht
b_R		Regressionskoeffizient der ersten forminduzierten Unterschicht
B	[-]	Integrationskonstante für raue Sohlen
B_A	[m]	Breite einer Fläche
B_R	[m]	Rinnen- bzw. Gewässerbreite
C_1, C_2		Beiwerte zur Berücksichtigung der von einem Würfel abweichenden Kornform
C_K	[-]	Rauheitsdichte
C_K'	[-]	modifizierte Rauheitsdichte
C	[-]	Integrationskonstante
d	[m]	vertikaler Versatz
d_A	[m]	Kugelabschnitt
d_{avg}	[m]	aus Sohlen- und Geschiebematerial gemittelter Korndurchmesser (EGIAZAROFF, 1965)
d_g	[m]	geometrischer Korndurchmesser
d_i	[m]	Korndurchmesser der Fraktion i
d_{ia}	[m]	untere Korngrenze der Fraktion i
d_{ib}	[m]	obere Korngrenze der Fraktion i
d_K	[m]	Korn- bzw. Kugeldurchmesser
d_m	[m]	mittlerer Korndurchmesser nach MEYER-PETER & MÜLLER (1949)
d_{max}	[m]	Größtkorn einer Kornmischung
d_{min}	[m]	Kleinstkorn einer Kornmischung
d_{zu}	[m]	Korndurchmesser des Zugabematerials
d_{50}	[m]	Korndurchmesser bei 50 % Siebdurchgang (andere Zahlen entsprechend)

in Zusammenhang mit einem Korndurchmesser werden folgende Indizes verwendet:

D = Kornmischung der Deckschicht im Zustand maximaler Bettstabilität;
 G = Kornmischung des Geschiebes bestehend aus Sohlenmaterial;
 S = Kornmischung der Sohlenoberfläche;
 Z = Kornmischung der Deckschicht im stabilen Zwischenzustand

D_F		Sieblinie der zur Fuller-Kurve gehörenden Deckschicht im Zustand maximaler Bettstabilität
D_X		Sieblinie einer Deckschicht im Zustand maximaler Bettstabilität
f		fluktuierende Größe
F_L	[N]	Liftkraft
Fr	[-]	Froude-Zahl
Fr_g	[-]	Korn-Froude-Zahl nach SCHÖBERL (1979)
Fr_c	[-]	Parameter zur Bestimmung des Bewegungsbeginns nach SCHÖBERL (1979) bzw. CHIN (1985)
F_T	[N]	Strömungskraft
F_u	[-]	Flachheit der Häufigkeitsverteilung der turbulenten Schwankungen
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung

g_B	[kg/m·s]	Geschiebetransportrate bezogen auf das Trockengewicht
g_{BS}	[kg/m·s]	Geschiebetransportrate des Sohlenmaterials bezogen auf das Trockengewicht
g_{BZ}	[kg/m·s]	Geschiebetransportrate des Zugabematerials bezogen auf das Trockengewicht
g_o	[-]	Ausgleichsfunktion nach PARKER (1990)
g_r	[kg/m·s]	Referenztransportrate
g_{zu}	[kg/m·s]	Zugaberate bezogen auf das Trockengewicht
G	[N]	Gewichtskraft
G_x	[N]	Gewichtskraft in x-Richtung
G_X		Sieblinie des Geschiebes
$G(\phi_i)$		Funktion zur Berechnung der Geschiebetransportrate nach PARKER (1990)
h	[m]	Wassertiefe
h_c	[m]	kritische Wassertiefe
h_m	[m]	mittlere Wassertiefe
h_{max}	[m]	Wassertiefe, in der $u(z) = u_{max}$
i		Zählvariable
I	[N/s]	Impuls
I'	[-]	Kornreibungsgefälle
I_E	[-]	Energielinienneigung
I_s	[-]	Sohlenneigung
I_T	[1/s]	Transportintensität
j		Zählvariable
k	[m ² /s ²]	kinetische Energie
k	[m]	absolute Rauheitshöhe
k_r	[m ^{1/3} /s]	auf das Korn bezogener Strickler-Beiwert
k_S	[m]	äquivalente Sandrauheit nach NIKURADSE (1933)
k_{St}	[m ^{1/3} /s]	Strickler-Beiwert
k_W		Wellenzahl
Ku_u	[-]	Kurtosis der Häufigkeitsverteilung der turbulenten Schwankungen
l	[m]	Mischungsweglänge
l_L	[m]	logarithmische Mischungsweglänge
l_R	[m]	rauheitsinduzierte Mischungsweglänge der ersten forminduzierten Unterschicht
l_{R2}	[m]	rauheitsinduzierte Mischungsweglänge der zweiten forminduzierten Unterschicht
l_u	[m]	Mischungsweglänge in x-Richtung
l_w	[m]	Mischungsweglänge in z-Richtung
L	[m]	Abstand vom Beginn eines Elements zum Beginn des nächsten
L_A	[m]	Länge einer Fläche
L_E	[m]	Elementlänge
m		Steigung einer Regressionsgeraden
m_L		Steigung der Regressionsgeraden in der logarithmischen Schicht
m_R		Steigung der Regressionsgeraden in der ersten forminduzierten Unterschicht
n		Zählvariable
p	[N/m ²]	Druck
p_{bj}	[-]	Wahrscheinlichkeit, dass ein Partikel d_j der Fraktion j vor einem Partikel d_i der Fraktion i liegt
p_{ei}	[-]	Wahrscheinlichkeit eines Partikels d_i höher als ein Partikel d_j zu liegen für eine Kornmischung
$p_{ei,j}$	[-]	Wahrscheinlichkeit eines Partikels d_i höher als ein Partikel d_j zu liegen für eine Fraktion
p_{hi}	[-]	Wahrscheinlichkeit eines Partikels d_i niedriger als ein Partikel d_j zu liegen für eine Kornmischung

$p_{hi,j}$	[-]	Wahrscheinlichkeit eines Partikels d_i niedriger als ein Partikel d_j zu liegen für eine Fraktion
p_i	[-]	Siebdurchgang aufsummiert bis zur Fraktion i
q	[m ² /s]	spezifischer Durchfluss
q_B	[m ³ /m·s]	gesamte Geschiebetransportrate bezogen auf das Volumen
q_{Bi}	[m ³ /m·s]	Geschiebetransportrate der Fraktion i bezogen auf das Volumen
q_c	[m ² /s]	kritischer spezifischer Durchfluss
q_r	[m ² /s]	auf die Sohle bezogener spezifischer Durchfluss
Q	[m ³ /s]	Durchfluss
Q_c	[m ³ /s]	kritischer Durchfluss der Deckschicht im Zustand maximaler Bettstabilität
Q_{zu}	[m ³ /s]	Durchfluss während der Zugabe
Q_1	[m ³ /s]	Durchfluss während der ersten Abpflasterung
Q_2	[m ³ /s]	Durchfluss nach der Zugabe
R	[m]	hydraulischer Radius
R_b	[m]	auf die Sohle bezogener hydraulischer Radius
Re	[-]	Reynolds-Zahl
Re_*	[-]	Korn-Reynolds-Zahl
R_G	[N]	Reibungskraft
R^2		Determinationskoeffizient einer Regression
s	[m]	Standardabweichung der Sohlenerhebungen
S_u	[-]	Schiefe der Häufigkeitsverteilung der turbulenten Schwankungen
t	[s]	Zeit
T	[min]	Zugabedauer
TG	[kg]	Gesamtmenge des transportierten Materials
TS	[kg]	Menge an erodiertem Sohlenmaterial
$TS_{(V_0)}$	[kg]	Menge an erodiertem Sohlenmaterial durch einfache Durchflusserhöhung ohne Zugabe
TZ	[kg]	Menge an transportiertem Zugabematerial
u	[m/s]	Geschwindigkeit in x-Richtung
u_c	[m/s]	kritische Fließgeschwindigkeit
u_m	[m/s]	mittlere Fließgeschwindigkeit
u_{max}	[m/s]	maximale Fließgeschwindigkeit
u_{mvor}	[m/s]	mittlere Fließgeschwindigkeit über der statischen Deckschicht direkt vor Zugabebeginn
u_{mnach}	[m/s]	mittlere Fließgeschwindigkeit über der statischen Deckschicht nach Restabilisierung der Sohle
u_{m5}	[m/s]	mittlere Fließgeschwindigkeit nach erhöhtem Durchfluss
u_R	[m/s]	Fließgeschwindigkeit in der Höhe z_R
u_{R2}	[m/s]	Fließgeschwindigkeit in der Höhe z_{R2}
u_{δ}	[m/s]	Fließgeschwindigkeit in der Höhe δ_V
u^*	[m/s]	Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit berechnet mit h
u^*_c	[m/s]	kritische Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit
u^*_l	[m/s]	untere Grenze zur Entwicklung statischer Deckschichten
u^*_t	[m/s]	Übergangsohlenschubspannungsgeschwindigkeit von statischen zu mobilen Deckschichten
u^*_u	[m/s]	obere Grenze zur Ausbildung mobiler Deckschichten
u^*_{*1}	[m/s]	Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit berechnet mit h_a
v	[m/s]	Geschwindigkeit in x-Richtung
V_{Fest}	[m ³]	Feststoffvolumen
w	[m/s]	Geschwindigkeit in z-Richtung
W_r^*	[-]	dimensionslose Referenztransportrate nach PARKER (1990)
x		Koordinate in Hauptströmungsrichtung
y		Koordinate lateral zur Hauptströmungsrichtung
z		Koordinate vertikal zur Hauptströmungsrichtung

z_{bm}	[m]	mittlere Sohlenhöhe der „eingeschmolzenen“ Rauheit nach SCHLICHTING (1936)
z_L	[m]	Höhe der logarithmischen Schicht
z_{max}	[m]	maximale Wassertiefe
z_{min}	[m]	kleinste Rauheitserhebung
z_R	[m]	Höhe der Rauheitsschicht
z_{R2}	[m]	Höhe der zweiten forminduzierten Unterschicht
z_{wsp}	[m]	Höhe des Wasserspiegels
z^+	[-]	dimensionslose vertikale Koordinate
z_c^+	[-]	Ort der maximalen relativen Turbulenzintensität (u'/u_*)
Z	[kg]	Zugabemenge
Z_X		Sieblinie einer Deckschicht im stabilen Zwischenzustand
α	[°]	Neigungswinkel der Sohle
α_H	[-]	Vorfaktor der Ausgleichsfunktion nach HUNZIKER (1995)
β_H	[-]	Exponent der Ausgleichsfunktion nach HUNZIKER (1995)
β_{Wu}	[-]	Exponent der Ausgleichsfunktion nach WU ET AL. (2000)
δ_V	[m]	Dicke der viskosen Grenzschicht
Δ_i	[m]	Höhendifferenz zwischen zwei benachbarten Partikeln
Δp_i	[-]	Gewichtsanteil der Fraktion i
Δx	[m]	Schrittweite in x-Richtung
Δy	[m]	Schrittweite in y-Richtung
ϕ_i	[-]	dimensionsloser Strömungsangriff berechnet für die Fraktion i nach PARKER (1990)
ϕ_{g0}	[-]	dimensionsloser Strömungsangriff berechnet für d_g nach PARKER (1990)
φ	[°]	innerer Reibungswinkel
η	[-]	Parameter zur Berücksichtigung von Schubspannungsschwankungen nach GÜNTER (1971)
κ	[-]	von Kármán Konstante
λ	[-]	Widerstandsbeiwert nach Darcy-Weisbach
λ_G	[-]	Parameter zur Berücksichtigung der Kornlagerung nach GÜNTER (1971)
ν	[m ² /s]	kinematische Viskosität des Wassers
ν_L	[m ² /s]	Wirbelviskosität der logarithmischen Schicht
ν_R	[m ² /s]	rauheitsinduzierte Wirbelviskosität der ersten forminduzierten Unterschicht
ν_{R2}	[m ² /s]	rauheitsinduzierte Wirbelviskosität der zweiten forminduzierten Unterschicht
ν_T	[m ² /s]	Wirbelviskosität
Π	[-]	Wake-Parameter nach COLES (1956)
ρ	[kg/m ³]	Dichte des Wassers
ρ_S	[kg/m ³]	Dichte des Sediments
σ_g	[-]	geometrische Standardabweichung einer Sieblinie
σ_k	[m]	Standardabweichung der Rauheitserhebungen
σ_{Luft}	[-]	Luftbeimischungskoeffizient
σ_u	[m/s]	Standardabweichung der turbulenten Schwankungen in x-Richtung
$\sigma_{\bar{u}}$	[m/s]	Standardabweichung der räumlichen Schwankungen der Geschwindigkeit in x-Richtung
σ_ϕ	[-]	Standardabweichung einer Sieblinie
$\sigma_{\phi 0}$	[-]	Parameter zur Berücksichtigung der Standardabweichung einer Sieblinie nach PARKER (1990)
τ	[N/m ²]	Schubspannung

τ_T	$[\text{N/m}^2]$	turbulente Schubspannung
τ_V	$[\text{N/m}^2]$	viskose Schubspannung
τ_0	$[\text{N/m}^2]$	Sohlenschubspannung
τ_{0c}	$[\text{N/m}^2]$	kritische Sohlenschubspannung
τ_{0ci}	$[\text{N/m}^2]$	kritische Sohlenschubspannung der Fraktion i
τ_{0cm}	$[\text{N/m}^2]$	kritische Sohlenschubspannung berechnet mit d_m
τ_{0cmax}	$[\text{N/m}^2]$	kritische Sohlenschubspannung der Deckschicht im Zustand maximaler Bettstabilität nach SCHÖBERL (1979)
τ^*	$[-]$	Shields-Parameter (dimensionslose Sohlenschubspannung)
τ_c^*	$[-]$	kritischer Shields-Parameter
τ_{ci}^*	$[-]$	kritischer Shields-Parameter der Fraktion i
τ_{g^*}	$[-]$	Shields-Parameter berechnet mit d_g
τ_m	$[-]$	Shields-Parameter berechnet mit d_m
ω	$[-]$	Funktion der Häufigkeitsverteilung der Sieblinie einer mobilen Deckschicht nach PARKER (1990)
ω_o	$[-]$	Parameter zur Berücksichtigung der Häufigkeitsverteilung der Sieblinie einer mobilen Deckschicht nach PARKER (1990)
R		Reynolds-Spannungstensor

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Grenzen der Entwicklung von statischen und mobilen Deckschichten (JAIN, 1990).....	5
Abb. 2.2	Wahrscheinlichkeitsfunktionen der für den Bewegungsbeginn maßgebenden Schubspannungen (nach GRASS, 1970).....	6
Abb. 2.3	Shields-Diagramm (aus SHIELDS, 1936) (die Nomenklatur wurde angepasst).....	8
Abb. 2.4	Bewegungsbeginn in Abhängigkeit der Kornform (nach CARLING ET AL., 1992) (p. = parallel, q. = quer, s. = schräg zur Strömung).....	10
Abb. 2.5	Einfluss des relativen Herausragens auf den Bewegungsbeginn (nach FENTON & ABBOTT, 1977).....	11
Abb. 2.6	Parameter einer Sieblinie.....	13
Abb. 2.7	Bewegungsbeginn der Fraktionen a) unimodaler Kornmischungen und b) bimodaler Kornmischungen (WILCOCK, 1993).....	15
Abb. 2.8	Aufgenommene Deckschicht der Rheinsohle (Photo: Gölz, BfG Koblenz).....	16
Abb. 2.9	Vergleich zwischen berechnetem und gemessenem Bewegungsbeginn entsprechend der Unterteilung nach Tab. 2.1 (nach KOLL & DITTRICH, 1999)...	18
Abb. 2.10	a) Sieblinien des Unterschichtmaterials A_x und der Deckschicht im stabilen Zwischenzustand Z_x sowie der maximalen Deckschicht D_x der Elbe bei Wittenberg/Lutherstadt b) Häufigkeitsverteilungen von A_x , Z_x und D_x	19
Abb. 2.11	Skizze morphologischer Strukturen in steilen Gewässern (aus DE JONG, 1995; TAIT & WILLETTS, 1992; HAYWARD, 1980).....	20
Abb. 2.12	Einfluss der relativen Überdeckung h/d_{50} auf den Shields-Parameter τ_c^* (Daten entnommen aus SUSZKA, 1991).....	22
Abb. 2.13	Kritischer Shields-Parameter τ_c^* als Funktion der relativen Überdeckung R_b/d_K und der Korn-Reynolds-Zahl Re_* (aus SHVIDCHENKO & PENDER, 2000)...	23
Abb. 2.14	Aus einer Deckschicht erodierte Kiesmengen ($d_{50} = 9$ mm) als Funktion der Zugabemenge von Sand ($d_{50} = 0,3$ mm) (nach JACKSON & BESCHTA, 1984).....	24
Abb. 2.15	Geschiebetransportrate bei Klarwasserabfluss und bei einer Zugaberate von $0,3$ kg/m \cdot min jeweils bei locker gelagerten Ausgangssohlen (nach WILLETTS ET AL., 1997).....	26
Abb. 2.16	Sohlenaufbau und Sieblinien bei mobilem Gleichgewicht (nach PARKER ET AL., 1982a).....	28
Abb. 2.17	Änderung des Geschiebetransports pro Breitereinheit und Sohlenneigung $q_B/l_S^{3/2}$ mit dem spezifischen Differenzdurchfluss ($q-q_c$) (aus BATHURST ET AL., 1987; modifiziert) (in Klammern ist der d_{50S} der Sohlenoberfläche angegeben).....	29
Abb. 2.18	Sieblinien der von MEYER-PETER & MÜLLER (1948), SMART & JÄGGI (1983) und RICKENMANN (1990) untersuchten Kornmischungen.....	31
Abb. 2.19	Bestimmung der Parameter ω_o und $\sigma_{\phi o}$ (aus PARKER, 1990).....	34
Abb. 2.20	Versuchsstand der Stabilitätsversuche (unmaßstäblich).....	37
Abb. 2.21	Sieblinien und charakteristische Korndurchmesser des Ausgangsmaterials A_x und der Deckschicht im Zustand maximaler Sohlenstabilität D_x	37
Abb. 2.22	Ablauf der Zugabeversuche.....	38

Abb. 2.23	Sieblinien des Zugabematerials, der Ausgangs- und der Deckschichtmischung	40
Abb. 2.24	Reproduzierbarkeit der Transportraten des Sohlenmaterials g_{BS} , des Zugabematerials g_{BZ} und des gesamten Geschiebes g_B für den fünfmal wiederholten Versuch V3 ($g_{zu} = 5 \text{ kg/m}\cdot\text{min}$, $T = 60 \text{ min}$, $d_{zu} = 5 - 8 \text{ mm}$)	42
Abb. 2.25	Reproduzierbarkeit der während der Zugabe und der anschließenden Restabilisierung transportierten Mengen.....	43
Abb. 2.26	Reproduzierbarkeit des mittleren Korndurchmessers d_{mG} des erodierten Sohlenmaterials	43
Abb. 2.27	Reproduzierbarkeit der mittleren Fließgeschwindigkeiten u_m bei bewegter Sohle.....	43
Abb. 2.28	Reproduzierbarkeit der mittleren Fließgeschwindigkeit u_m , der Sohlenneigung I_s , der Standardabweichung der Sohlenerhebungen s und des mittleren Korndurchmessers d_{mD} jeweils vor und nach der Zugabe.....	44
Abb. 2.29	Transportraten des Versuchs V3 ($d_{zu} = 5 - 8 \text{ mm}$; $g_{zu} = 5 \text{ kg/m}\cdot\text{min}$; $T = 60 \text{ min}$).....	45
Abb. 2.30	Anteil von Sohlen- und Zugabematerial am Geschiebe für V3.....	46
Abb. 2.31	Transportraten des Versuchs V5 ($d_{zu} = 5 - 8 \text{ mm}$; $g_{zu} = 5 \text{ kg/m}\cdot\text{min}$; $T = 480 \text{ min}$).....	47
Abb. 2.32	Normierte Transportraten als Funktion der Zugaberate für $d_{zu} = 5 - 8 \text{ mm}$ (V1: $T = 120 \text{ min}$; V2, V3, V6, V7: $T = 60 \text{ min}$).....	48
Abb. 2.33	Anteil von Sohlen- und Zugabematerial am Geschiebe für V7.....	49
Abb. 2.34	Normierte Transportraten als Funktion der Zugaberate für $d_{zu} = 8 - 16 \text{ mm}$ (V9: $T = 120 \text{ min}$; V10, V11: $T = 60 \text{ min}$)	50
Abb. 2.35	Aufnahme der Schicht aus Zugabematerial am Ende des Versuchs V9.....	50
Abb. 2.36	Transportraten als Funktion der Zugabefraktion	51
Abb. 2.37	Transportraten der Zugabefraktionen in V14 ($g_{zu} = 5 \text{ kg/m}\cdot\text{min}$)	52
Abb. 2.38	Aufnahme der Schicht aus Zugabematerial 20 min nach Zugabebeginn von V14	53
Abb. 2.39	Transportraten der Versuche mit Durchflusserhöhung ausgehend von der Deckschicht bei $Q_1 = Q_c = 3,2 \text{ l/s}$ (V0.2: ohne Zugabe, V17: $d_{zu} = 5 - 8 \text{ mm}$, V18: $d_{zu} = 8 - 16 \text{ mm}$, V12.2: Erhöhung auf $Q = 3,7 \text{ l/s}$).....	55
Abb. 2.40	Transportraten der Versuche mit Durchflusserhöhung ausgehend von der Deckschicht bei $Q_1 = 2,4 \text{ l/s}$ (V0.1: ohne Zugabe, V15 und V16: $d_{zu} = 5 - 8 \text{ mm}$) sowie V3	56
Abb. 2.41	Einfluss der Zugaberate, -dauer und der Durchflusserhöhung (V15 - V18) auf das Verhältnis des transportierten Sohlenmaterials TS zum Sohlenmaterial $TS_{(V0)}$, das durch Durchflusserhöhung ohne Zugabe transportiert wurde.....	57
Abb. 2.42	Menge des erodierten Sohlenmaterials TS als Funktion der Zugaberate.....	58
Abb. 2.43	Verhältnis der während der Zugabe erodierten Mengen an Sohlenmaterial bei gleichzeitiger Durchflusserhöhung TS zum nur durch Durchflusserhöhung erodierten Sohlenmaterial $TS_{(V0)}$	59
Abb. 2.44	Menge des erodierten Sohlenmaterials TS als Funktion der Zugabefraktion	59
Abb. 2.45	In der Sohle verbliebenes Zugabematerial (Z-TZ)als Funktion der Zugabemenge Z für $d_{zu} = 5 - 8 \text{ mm}$	60

Abb. 2.46	Vergleich der Schicht aus Zugabematerial der Versuche V5 ($g_{zu} = 5$ kg/m·min, $T = 480$ min) und V7 ($g_{zu} = 40$ kg/m·min, $T = 60$ min) (Zugabematerial dunkel eingefärbt).....	60
Abb. 2.47	Mittlerer Korndurchmesser d_{mG} des erodierten Sohlenmaterials als Funktion der Zugaberate für $d_{zu} = 5 - 8$ mm	61
Abb. 2.48	Mittlerer Korndurchmesser d_{mG} des erodierten Sohlenmaterials als Funktion der Zugaberate für $d_{zu} = 8 - 16$ mm	61
Abb. 2.49	Mittlerer Korndurchmesser d_{mG} des erodierten Sohlenmaterials als Funktion der Zugabefraktion ($g_{zu} = 5$ kg/m·min)	62
Abb. 2.50	Mittlerer Korndurchmesser d_{mG} des erodierten Sohlenmaterials als Funktion der Durchflusserhöhung von $Q_c = 3,2$ l/s auf $3,7$ l/s	62
Abb. 2.51	Sieblinien des erodierten Sohlenmaterials der Versuche V1 und V17	63
Abb. 2.52	Vergleich der mittleren Fließgeschwindigkeit gemessen mit der Salzverdünnungsmethode und bestimmt anhand von Fotos für V5 und V7.....	64
Abb. 2.53	Änderung der mittleren Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zugaberate für $d_{zu} = 5 - 8$ mm und $d_{zu} = 8 - 16$ mm	64
Abb. 2.54	Änderung der mittleren Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zugabefraktion	65
Abb. 2.55	Gegenüberstellung der Transportraten und Geschwindigkeiten der Versuche V8 und V10.....	65
Abb. 2.56	Geschwindigkeiten bei Durchflusserhöhung und Geschiebezugabe.....	66
Abb. 2.57	Änderung der Parameter der statischen Sohle in Abhängigkeit der Zugaberate.....	67
Abb. 2.58	Änderung der Parameter der statischen Sohle in Abhängigkeit der Zugabefraktion	68
Abb. 2.59	Gemessene und nach MEYER-PETER & MÜLLER (MPM), SMART & JÄGGI (SJ), RICKENMANN (Rick.) und PALT berechnete Transportraten	71
Abb. 2.60	Verhältnis der berechneten zu den gemessenen Transportraten in unterschiedlichen Zeitabschnitten des Versuchs V5 sowie des Versuchs V7	72
Abb. 3.1	Unmaßstäbliche Einteilung des Geschwindigkeitsfeldes über glatten und rauen Sohlen.....	80
Abb. 3.2	Definitionsskizze vertikaler Abmessungen.....	80
Abb. 3.3	Vertikales Profil der Geschwindigkeit und der Schubspannung in turbulenten Strömungen.....	85
Abb. 3.4	Definitionsskizze zur Impulsübertragung (nach SCHLICHTING & GERSTEN, 1997).....	86
Abb. 3.5	Verteilung der relativen Turbulenzintensität, Schiefe und Flachheit über glatten und rauen Sohlen (nach DITTRICH ET AL., 1996; modifiziert).....	91
Abb. 3.6	Änderung des Anteils der Rauheitsschicht am Geschwindigkeitsfeld z_R/z_{max} mit der relativen Überdeckung z_{max}/k (hier: $z_R =$ Höhe von $(\sigma_u/u^*)_{max}$).....	92
Abb. 3.7	Mögliche Strömungsarten über rauen Sohlen nach MORRIS (1955) (aus DITTRICH, 1998).....	95
Abb. 3.8	Definitionsskizze der Rauheitsdichten c_K und c_K' (nach DITTRICH, 1998; modifiziert)	95

Abb. 3.9	Erläuterungsskizze zur Mischungsweglänge (nach SCHLICHTING & GERSTEN, 1997)	96
Abb. 3.10	Abhängigkeit der Konstanten B von Re_* nach SCHLICHTING (1982) (aus DITTRICH, 1998; modifiziert).....	100
Abb. 3.11	Abweichung der gemessenen Geschwindigkeit vom logarithmischen Geschwindigkeitsprofil (nach Dittrich, 1998).....	100
Abb. 3.12	Abhängigkeit des Verhältnisses k_S/k von der relativen Überdeckung	101
Abb. 3.13	Abhängigkeit des Verhältnisses k_S/z_L von der relativen Überdeckung	101
Abb. 3.14	Geschwindigkeitsprofil bei $z_{max}/k = 3,85$ (nach DITTRICH & KOLL, 1997).....	102
Abb. 3.15	Bestimmung des vertikalen Versatzes und der äquivalenten Sandrauheit nach der Methode von CLAUSER (1956)	103
Abb. 3.16	d/k als Funktion von Re_*	103
Abb. 3.17	Schematisierte Darstellung eines Haarnadelwirbels (aus NEZU & NAKAGAWA, 1993a).....	105
Abb. 3.18	Skizze zum Entstehen und Aufbrechen eines Haarnadelwirbels	106
Abb. 3.19	Geschwindigkeitsprofile bei geringen relativen Überdeckungen (nach DITTRICH & KOLL, 1997; modifiziert).....	109
Abb. 3.20	Maximalwert der relativen Turbulenzintensität $(\sigma_u/u^*)_{max}$ als Funktion der relativen Überdeckung	109
Abb. 3.21	Berechnung von u^* mit Hilfe des logarithmischen Geschwindigkeitsgesetzes nach Gl. (3.15) (Daten aus DITTRICH & KOLL, 1997)	110
Abb. 3.22	Berechnung von u^* aus der Verteilung der Reynoldsspannungen (Daten aus NIKORA & GORING, 2000)	111
Abb. 3.23	Zusammenstellung der Berechnungsansätze des vertikalen Geschwindigkeitsprofils in der Wandregion	113
Abb. 3.24	Berechnung des vertikalen Versatzes d und der von Kármán Konstante κ (Daten aus DITTRICH & KOLL, 1997).....	115
Abb. 3.25	Berechnung der Mischungsweglänge l_R der ersten forminduzierten Unterschicht (Daten aus DITTRICH & KOLL, 1997).....	116
Abb. 3.26	Kleine Kiprinne des Theodor-Rehbock-Laboratoriums	117
Abb. 3.27	Große Kiprinne des Theodor-Rehbock-Laboratoriums	117
Abb. 3.28	Darstellung der untersuchten Rauheiten	120
Abb. 3.29	Achsenbezeichnung bei Kies und den Glaskugeln	123
Abb. 3.30	Vergleich von h_m und h	124
Abb. 3.31	Vergleich von d und z_{bm}	124
Abb. 3.32	Normierte Standardabweichung der doppelt gemittelten Geschwindigkeitsprofile der Versuchsreihe R0	125
Abb. 3.33	Mit den Parametern der zweiten forminduzierten Unterschicht normierte Geschwindigkeitsprofile.....	128
Abb. 3.34	Ausschnitt der normierten Geschwindigkeitsprofile der zweiten forminduzierten Unterschicht.....	128
Abb. 3.35	Mit den Parametern der ersten forminduzierten Unterschicht normierte Geschwindigkeitsprofile	129

Abb. 3.36	Ausschnitt der normierten Geschwindigkeitsprofile der ersten forminduzierten Unterschicht	129
Abb. 3.37	Abhängigkeit der Mischungsweglänge l_R a) von der absoluten Rauheitshöhe k und b) von der relativen Überdeckung h/k	130
Abb. 3.38	Zusammenhang zwischen l_R/k und der Korn-Reynolds-Zahl Re^*	130
Abb. 3.39	Zusammenhang zwischen der Wirbelviskosität ν_R und der Korn-Reynolds-Zahl Re^*	130
Abb. 3.40	Zusammenhang zwischen der Höhe der Rauheitsschicht z_R und der absoluten Rauheitshöhe k	131
Abb. 3.41	Abhängigkeit des Verhältnisses z_R/k a) von der Unregelmäßigkeit der Rauheitsoberfläche σ_k/k , b) von der Rauheitsdichte c_K' , c) von der relativen Überdeckung h/k und d) von der Korn-Reynolds-Zahl Re^*	131
Abb. 3.42	Abhängigkeit der Integrationskonstanten $C = u_R/u^*$ a) von der relativen Überdeckung h/k und b) von der Rauheitsdichte z_{bm}/z_R	132
Abb. 3.43	Vergleich $\kappa = \text{variabel}$ mit $\kappa = \text{const.}$ für $R0$	133
Abb. 3.44	a) Normierte Geschwindigkeitsprofile nach Option 1 (ν_R vernachlässigt, $\kappa = \text{variabel}$) b) Normierte Geschwindigkeitsprofile nach Option 2 (ν_R berücksichtigt, $\kappa = \text{variabel}$)	134
Abb. 3.45	a) Normierte Geschwindigkeitsprofile nach Option 1 (ν_R vernachlässigt, $\kappa = \text{const.}$) b) Normierte Geschwindigkeitsprofile nach Option 2 (ν_R berücksichtigt, $\kappa = \text{const.}$)	135
Abb. 3.46	Abhängigkeit des vertikalen Versatzes d a) von der absoluter Rauheitshöhe k und b) von der relativen Überdeckung h/k	136
Abb. 3.47	Abhängigkeit des Verhältnisses d/k a) von der relativen Überdeckung h/k und b) von der Korn-Reynolds-Zahl Re^*	136
Abb. 3.48	Abhängigkeit der von Kármán Konstante κ a) von der Wassertiefe h , b) von der relativen Überdeckung h/k , c) von dem Breiten-/Tiefenverhältnis B_R/h , d) von der Korn-Reynolds-Zahl Re^* , e) von der Unregelmäßigkeit der Rauheitsoberfläche σ_k/k und f) vom Verhältnis d/k	138

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Klassierung vorhandener Stabilitätsansätze entsprechend dem Stabilitätszustand einer Sohle (nach DITTRICH, 1998).....	17
Tab. 2.2	Versuche mit der Zugabefraktion 5 - 8 mm.....	40
Tab. 2.3	Versuche mit verschiedener Zugabefraktion (V13: Zugabemischung entspricht der Fraktion 8-16 mm mit Über- und Unterkorn; V14: Zugabemischung enthält die drei Fraktionen im Verhältnis 1:1:1).....	41
Tab. 2.4	Versuche bei unterschiedlichem Durchfluss während der Deckschichtbildung und der Zugabe.....	41
Tab. 2.5	Kritischer Durchfluss der Zugabematerialien.....	53
Tab. 2.6	Parameter und Geschiebetransportraten der gemittelten Versuche vor der Zugabe.....	68
Tab. 2.7	Gemessene und nach MEYER-PETER & MÜLLER (MPM), SMART & JÄGGI (SJ), RICKENMANN (Rick.) und PALT berechnete Transportraten [kg/m·min].....	70
Tab. 2.8	Gemessene und berechnete Transportraten der Versuche V5 und V7.....	72
Tab. 2.9	Auswirkungen des Eintrags von externem Geschiebe (kritischer Durchfluss = Q_{CG}) auf eine statische Deckschicht (kritischer Durchfluss = Q_{CD}) (g_{BS} = Transportrate des Sohlenmaterials, TS = transportierte Menge des Sohlenmaterials).....	74
Tab. 3.1	Zusammenstellung von in der Literatur angegebenen Werten für das Verhältnis der Höhe der Rauheitsschicht z_R zur absoluten Rauheitshöhe k	93
Tab. 3.2	Spezifikation der verwendeten Laser.....	118
Tab. 3.3	Versuchsparameter zum Geschwindigkeitsfeld.....	119
Tab. 3.4	Parameter der zweiten und ersten forminduzierten Unterschicht sowie der logarithmischen Schicht.....	126

Verzeichnis der Anhänge

Anhang A Datengrundlage zu Kap. 2	A-1
A.1 Parameter der Zugaberversuche	A-1
A.2 Parameter der statischen Deckschichten	A-2
A.3 Transportierte Menge und mittlere Fließgeschwindigkeit	A-3
A.4 Sieblinien des erodierten Sohlenmaterials	A-11
A.5 Darstellung der Transportraten, der Geschiebezusammensetzung, des mittleren Korndurchmessers und der mittleren Fließgeschwindigkeit	A-25
A.6 Darstellung der Kornbänder des erodierten Sohlenmaterials	A-37
A.7 Darstellung der Sieblinien des erodierten Sohlenmaterials	A-43
Anhang B Datengrundlage zu Kapitel 3	B-1
B.1 Vertikale Geschwindigkeitsprofile	B-1
B.2 Darstellung der doppelt gemittelten Geschwindigkeitsprofile	B-23
B.3 Darstellung der Profile der Rauheitsintensität	B-26

1 Einleitung

Die Typisierung eines Fließgewässers erfolgt im allgemeinen nach morphologischen Kriterien, wobei anhand des Gefällebereichs Gebirgsbäche, Mittelgebirgsflüsse und Flachlandflüsse unterschieden werden. In der vorliegenden Arbeit werden Fragestellungen behandelt, die spezifisch für Gebirgsbäche sind. Da die Untersuchungen auf Laborversuchen basieren, wurde für den Titel der Begriff Raugerinne anstelle des Gebirgsbachs gewählt.

Ein wesentliches Charakteristikum des jeweiligen Gefällebereichs ist die Korngröße und die Breite des Korngrößenspektrums des Sohlenmaterials sowie die damit verbundene Ausbildung von Sohlenformen. Während sand- und feinkiesführende Flachlandflüsse Transportkörper ausbilden, ist für Mittelgebirgsflüsse die Selbststabilisierung der weitestgehend ebenen Kiessohlen durch statische Deckschichten typisch. Gebirgsbäche weisen weiterhin, bedingt durch ein sehr breites Korngrößenspektrum des Sohlenmaterials und die hohen Sohlenneigungen, mehr oder weniger ausgeprägte treppenartige Sohlenstrukturen auf. Ähnlich den Transportkörpern in sandführenden Flachlandflüssen wird der Fließwiderstand der Gebirgsbachsohle nicht nur durch die Kornrauheit, sondern in entscheidendem Maße auch durch die Formrauheit der Sohlenstrukturen bestimmt, wobei letztere jedoch lediglich durch extreme Hochwasserereignisse mobilisiert werden können. Die hydraulische Wirkung der Grobkomponenten und der Strukturen der Gebirgsbachsohlen wird durch die bei Niedrig- und Mittelwasser vorliegenden geringen Verhältnisse von Wassertiefe zu Sohlenrauheit verstärkt. Dabei ist das Strömungsfeld nicht nur durch die gegenseitige Beeinflussung von rauer Sohle und freiem Wasserspiegel gekennzeichnet, sondern zusätzlich durch die häufigen Fließwechsel zwischen strömendem und schießendem Abfluss. Aufgrund der verhältnismäßig kleinen Einzugsgebiete reagiert die Abflussganglinie sehr schnell auf Niederschlagsereignisse. Der Anstieg der Abflussganglinien ist dementsprechend steil und die Dauer eines Hochwassers auf wenige Stunden bis Tage begrenzt. Darüber hinaus sind große Hochwasserereignisse häufig mit Hangrutschungen, Murgängen und Oberflächenerosion verbunden, so dass die Gewässersohle nicht nur durch den erhöhten Strömungsangriff belastet wird, sondern abhängig von der Geologie und Morphologie des Einzugsgebietes auch durch eingetragenes Material. Deshalb sind neben der Gewässersohle als interne Geschiebequelle bei der Betrachtung der Sohlenstabilität und der Transportvorgänge in Gebirgsbächen auch externe Geschiebequellen zu berücksichtigen.

Die Untersuchung von Gebirgsbächen umfasst somit die folgenden Aufgabenbereiche:

- Art und Entstehung der Morphologie von Gebirgsbächen
- Sohlenstabilität unter Klarwasserabfluss sowie unter Berücksichtigung von Geschiebeeintrag
- Strömungsfeld und Fließwiderstand rauer Sohlen unter Berücksichtigung geringer relativer Überdeckungen
- Geschiebetransport unter Berücksichtigung von Deckschichtbildung und externem Materialeintrag

Zur Erforschung der Morphologie und Hydraulik von steilen Gewässern wurden in den letzten Jahren am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse an dieser Stelle kurz zusammengefasst werden sollen.

ROSPORT (1998) untersuchte in Laborversuchen die Morphologie von Gebirgsbächen und ihre Entstehungsmechanismen. Die sich ausbildenden Sohlenstrukturen hängen vom Gefällebereich und von dem dort anzutreffenden Sohlenmaterial ab. Während kiesführende Flüsse mit einer mittleren Sohlenneigung kleiner als etwa 2 % noch eine weitestgehend ebene Sohle aufweisen, ordnen sich die gröberen Sohlenkomponenten ab einem Gefälle von etwa 2 % in regelmäßigen Riffeln an. Riffel-Becken-Sequenzen sind dadurch gekennzeichnet, dass sie sich vor allem bei Niedrigwasser im Verlauf der Wasseroberfläche widerspiegeln. Mit zunehmendem Durchfluss verlieren sie an hydraulischer Wirksamkeit. Ist das Gefälle größer als etwa 8 %, dann sind die Sohlenstrukturen ausgeprägter und in kürzeren Abständen angeordnet. Aufgrund der mit dem Gefälle zunehmenden Größe der Grobkomponenten ist die Höhendifferenz der jetzt Absturz-Becken-Sequenz genannten Sohlenstrukturen (engl.: step-pool system) größer. Die Abstürze sind auch bei größeren Durchflüssen noch hydraulisch wirksam. Mit weiter zunehmendem Gefälle sind die Blöcke schließlich nicht mehr in Gruppen angeordnet, sondern wie bei rauen Rampen mehr oder weniger gleichmäßig über die Sohle verteilt.

Zur Erläuterung der Entstehung von Step-Pool-Systemen zieht ROSPORT (1998) die Antidünen-Theorie heran, wonach sich bei Froude-Zahlen > 1 der Wasserspiegel und die Transportkörper in Phase befinden und die Dünen entgegen der Fließrichtung wandern. Diese Beobachtungen treffen für Sand- und Kiessohlen zu, solange sie keine Tendenz zur Deckschichtbildung zeigen. Im Fall einer abpflasterungsfähigen Geschiebezusammensetzung wandert die Düne jedoch nicht stromaufwärts, sondern im Trog bzw. an der Luvseite werden Grobkomponenten abgelagert, die die spätere Krone eines Absturzes darstellen. Unterstrom der Ablagerung entsteht durch Auskolkung das Becken.

Die Beschreibung der Rauheit eines Gebirgsbachs anhand eines charakteristischen Korn-durchmessers liefert keine zufriedenstellenden Ergebnisse, da die Weite der Sieblinie und die sich ausbildenden Sohlenstrukturen nicht erfasst werden können. Aufbauend auf den Untersuchungen von ROSPORT (1998) identifizierte ABERLE (2000) die Standardabweichung der Sohlenerhebungen s als ein geeignetes Maß zur Charakterisierung der Sohlenrauheit steiler Gewässer. Mit Hilfe des neuen Parameters s gelang es ABERLE (2000) die Streubreite in den Berechnungsergebnissen deutlich zu reduzieren. In einem ausführlichen Studium existierender Ansätze zur Berechnung des Fließwiderstandes steiler Gewässer konnte er die Gefahr der Eigenkorrelation von Ansätzen aufzeigen, die die Froude-Zahl enthalten. Zur Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeit stellte er statt dessen ein Potenzgesetz auf, in dem der Vorfaktor und die Exponenten der Variablen (spezifischer Durchfluss, Erdbeschleunigung und Rauheitsmaß) eine Funktion des Sohlengefalles sind. Basierend auf den Labor-daten entwickelte er zusätzlich ein Kriterium zur Abschätzung der Sohlenstabilität steiler Gewässer bei Klarwasserabfluss, wonach der kritische Durchfluss pro Breitereinheit eine Funktion der Sohlenneigung und des Parameters s ist.

PALT (2001) führte zur Untersuchung der Sohlenstabilität und des Geschiebetransports zahlreiche Naturmessungen im Himalaya-Karakorum durch. Anhand der Naturdaten konnte er einen Unterschied im Bewegungsbeginn von feinem und grobem Sohlenmaterial feststellen. Dementsprechend stellte er zwei Formeln zur Berechnung der Sohlenstabilität von Gebirgsbächen auf: eine für die Kornfraktionen kleiner als 8 mm und eine für das Aufreißen der Deckschicht, d.h. wenn auch Fraktionen größer als 8 mm transportiert werden. PALT (2001) zufolge ist der kritische Durchfluss der groben Fraktionen etwa um das dreifache höher als der zur Mobilisierung der feinen Komponenten führende Durchfluss. Weiterhin leitete er unter Verwendung der Naturdaten sowie von Labordaten der ETH Zürich einen Ansatz zur Berechnung des Geschiebetransports ab. Dieser Potenzansatz folgt dabei nicht dem Konzept des Schubspannungsüberschusses, sondern setzt den herrschenden Strömungsangriff zum kritischen Strömungsangriff ins Verhältnis. Abhängig von einem korrigierten Shields-Parameter werden zwei Gleichungen angegeben, so dass zwischen selektiver Erosion und vollem Geschiebetrieb unterschieden wird.

Sowohl ABERLE (2000) als auch PALT (2001) stellten Gleichungen zur Berechnung des Fließwiderstandes auf, die auf dem logarithmischen Geschwindigkeitsgesetz basieren. Beide Autoren weisen jedoch darauf hin, dass die Steigung des Geschwindigkeitsprofils nicht mit derjenigen ebener Sohlen und großer relativer Überdeckungen übereinstimmt, wie auch die Zusammenstellung existierender Berechnungsansätze von ABERLE (2000) zeigt.

In der Fortsetzung der oben genannten Forschungsarbeiten behandelt die vorliegende Arbeit die wechselseitige Beeinflussung von Geschiebetransport und einer durch eine Deckschicht stabilisierten Sohle unter Berücksichtigung von Step-Pool-Systemen. Darüber hinaus wurde der Einfluss geringer relativer Wassertiefen auf das Geschwindigkeitsfeld über rauen Sohlen untersucht. Die Arbeit gliedert sich dementsprechend in zwei Hauptkapitel, in denen jeweils der Stand des Wissens, die Datengrundlage und die Ergebnisse aufbereitet sind.

Die Transportvorgänge in Raugerinnen werden in Kap. 2 behandelt. Zur Darlegung der Problematik sind der Stand des Wissens zur Sohlenstabilität und zur Berechnung des Geschiebetransports in kiesführenden Flüssen aufbereitet. Die Aufbereitung der Literatur führt zu den folgenden Fragen: Wird eine existierende statische Deckschicht durch den Materialeintrag von oberstrom in einen betrachteten Abschnitt geschützt, da ein Teil der Fließenergie zum Transport des Geschiebes benötigt wird? Oder wird die Deckschicht aufgrund zusätzlicher Impulse aus der Bewegung des Materials zerstört? Welchen Einfluss übt eine statische Deckschicht, die durch ausgeprägte Sohlenstrukturen gekennzeichnet ist, auf den Geschiebetransport aus und ist die Annahme eines mobilen Gleichgewichts zur Berechnung der Transportraten gerechtfertigt? Die Beantwortung der Fragen erfolgt anhand von Laborversuchen, in denen erstmalig systematisch der Einfluss von eingetragenen Geschiebe durch Variation der Zugaberate, -dauer und -fraktion untersucht wird. Die Einfärbung des Zugabematerials ermöglicht dabei die separate Analyse von erodiertem Sohlenmaterial und transportiertem Zugabematerial. Am Ende des Kapitels werden die Ergebnisse zusammenführend diskutiert.

Der zweite Teil der Arbeit (Kap. 3) beschäftigt sich mit dem Geschwindigkeitsfeld über rauen Sohlen bei geringen relativen Überdeckungen. Neben zeitlichen Schwankungen unterliegt das turbulente Geschwindigkeitsfeld über rauen Sohlen besonders im sohlennahen Bereich auch Schwankungen, die durch die räumliche Variabilität der Rauheit verursacht werden. Im Literaturstudium wird deshalb neben dem Stand des Wissens zum Geschwindigkeitsfeld über rauen Sohlen die Methode der doppelten Mittelung der Navier-Stokes-Gleichungen erläutert. Ein zentrales Problem der Untersuchung rauer Sohlen ist die Definition des Bezugsniveaus des logarithmischen Geschwindigkeitsprofils, da es wesentliche Parameter wie das hydraulische Rauheitsmaß, die Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit und die Steigung des Geschwindigkeitsprofils maßgeblich beeinflusst, die letztlich für die Berechnung des Fließwiderstands, der Sohlenstabilität und des Geschiebetransports erforderlich sind. Die hier vorgeschlagene neue Interpretation des Bezugsniveaus wird anhand von Labordaten überprüft, die über ebenen rauen Sohlen erhoben wurden. Das Kapitel wird mit einem Resümee abgeschlossen. Die erarbeiteten Erkenntnisse sind nochmals ausführlich in Kap. 4 zusammengefasst.

2 Wechselwirkung Sohlenstabilität - Geschiebetransport

Ziel des vorliegenden Kapitels ist die Erweiterung der Kenntnisse über die Sohlenstabilität und den Transport von Geschiebe in rauen Gewässern. Hierfür wird zunächst der aktuelle Stand des Wissens zur Sohlenstabilität sowie zum Geschiebetransport aufbereitet. Aus dem Literaturstudium folgt, dass ein weitestgehend unberücksichtigter Aspekt in der Untersuchung der Transportvorgänge die gegenseitige Beeinflussung einer statischen Deckschicht und dem Eintrag von Geschiebe ist. Vor allem in Gebirgsbächen, deren Sohlen aufgrund von Deckschichtbildung und der Ausbildung von Sohlenstrukturen eine hohe Stabilität aufweisen, ist der Geschiebeeintrag von außerhalb des betrachteten Abschnitts bzw. des Gewässers jedoch nicht zu vernachlässigen. Zur Untersuchung der Wechselwirkung wurde deshalb ein steiler Gefällebereich gewählt, so dass auch ausgeprägte Sohlenstrukturen berücksichtigt werden. Die am Theodor-Rehbock-Laboratorium durchgeführten Experimente werden im Anschluss an das Literaturstudium vorgestellt und analysiert. Die daraus resultierenden Erkenntnisse werden abschließend diskutiert.

Ein wesentliches Charakteristikum kiesführender Gewässer ist die Selbststabilisierung durch statische (engl.: static armour) oder mobile Deckschichten (engl.: pavement), deren Ausbildung abhängig vom vorhandenen Geschiebeangebot und den hydraulischen Verhältnissen ist. Der Übergang von einem stabilen Zustand in den anderen kann anhand des von JAIN (1990) aufgestellten Modells erläutert werden (Abb. 2.1). JAIN (1990) verwendete die Sohenschubspannungsgeschwindigkeit u_* zur Abgrenzung der unterschiedlichen Stabilitätsbereiche.

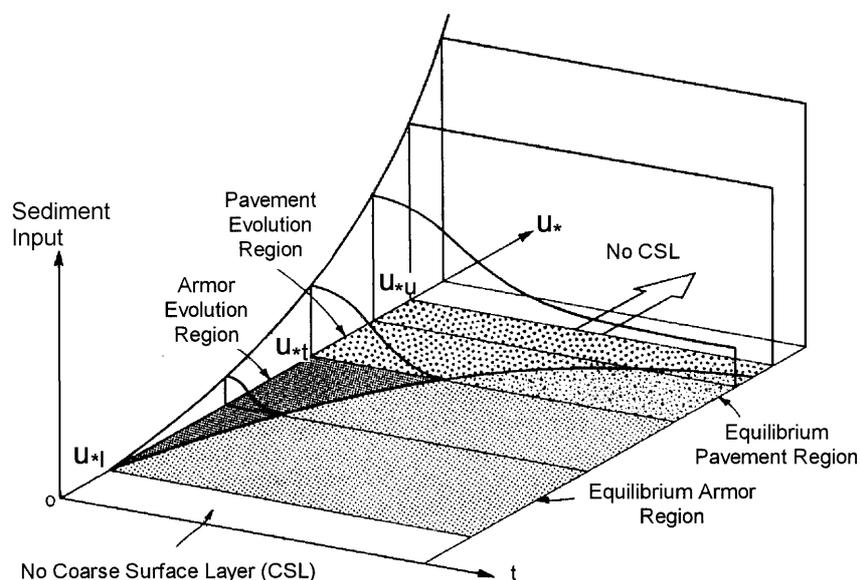


Abb. 2.1 Grenzen der Entwicklung von statischen und mobilen Deckschichten (JAIN, 1990)

Ausgehend von einer locker gelagerten Kiessohle muss der Strömungsangriff zunächst eine untere Grenze u_{*1} überschreiten, um die Sohle in Bewegung zu versetzen. Wird der Widerstand der an der Sohlenoberfläche vorhandenen Kornmischung nur geringfügig überschritten und weist die Kornmischung eine ausreichende Bandbreite auf, setzt nach unterstrom gerichteter *selektiver Transport* ein, d.h. die feineren Fraktionen werden bewegt, während die

richteter *selektiver Transport* ein, d.h. die feineren Fraktionen werden bewegt, während die größeren Fraktionen noch stabil bleiben. Der Geschiebeeintrag von oberstrom ist dabei vernachlässigbar und der Geschiebetransport geht trotz anhaltendem Strömungsangriff wieder auf nahezu Null zurück. Die Anreicherung der größeren Fraktionen an der Sohlenoberfläche wird als *statische Deckschicht* bezeichnet. Mit steigendem Strömungsangriff führt dieser Prozess solange zu einer Vergrößerung der Sohlenoberfläche und Erhöhung der Sohlenstabilität bis die Grenze u_{τ} erreicht ist. Überschreitet der Strömungsangriff diese Grenze, kann sich die Sohle bei vernachlässigbarem Geschiebeeintrag erst durch einen deutlichen Gefälleverlust wieder stabilisieren. Bei ausreichendem Geschiebeeintrag von oberstrom und anhaltendem Strömungsangriff geht die Transportrate nicht wieder gegen Null zurück. Statt dessen setzt *partieller Transport* ein, d.h. alle Fraktionen sind in Bewegung, aber mit gegenüber der Sieblinie des Sohlenmaterials veränderten Gewichtsanteilen (WILCOCK; 1997, 2001). Die Transportrate nähert sich einem im Mittel konstanten Wert, der vom Geschiebeeintrag, dem Strömungsangriff, dem Neigungsbereich der Sohle und dem Sohlenmaterial abhängig ist. Durch vertikale Sortierungsprozesse entsteht wiederum eine gröbere Sohlenoberfläche als beim ursprünglichen Sohlenmaterial, die jetzt aber beweglich ist, weshalb dieser Stabilitätszustand als *mobile Deckschicht* bezeichnet wird. Mit weiter steigendem Strömungsangriff und Geschiebeeintrag wird die obere Grenze u_u überschritten und der partielle Transport geht in *vollen Transport* über, d.h. auch die groben Fraktionen sind kontinuierlich in Bewegung. Eine mobile Deckschicht kann sich erst dann wieder ausbilden, wenn infolge von Erosion das Gefälle und damit der Strömungsangriff reduziert worden ist.

Der Übergang von Ruhe zu Bewegung sowie von einer Transportart zur nächsten erfolgt fließend und kann GRASS (1970) zufolge durch die Überlappung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Strömungsangriffs τ_0 und des Sohlenwiderstandes τ_{0c} beschrieben werden (Abb. 2.2). Je geringer der Abstand zwischen den beiden Mittelwerten wird, desto mehr nähert sich der Transport vom Bewegungsbeginn über selektiven und partiellen Transport dem vollen Transport.

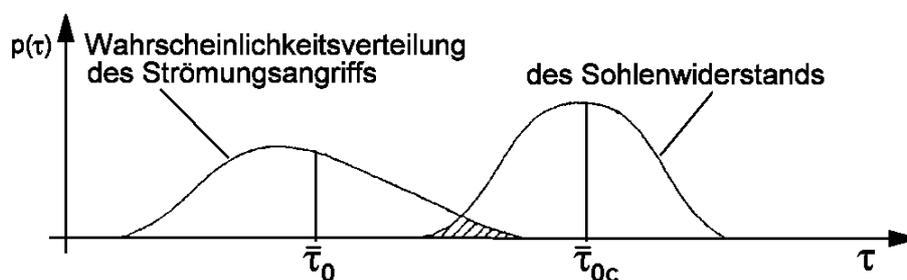


Abb. 2.2 Wahrscheinlichkeitsfunktionen der für den Bewegungsbeginn maßgebenden Schubspannungen (nach GRASS, 1970)

Dem Ansatz von GRASS (1970) folgend wurden stochastische Ansätze zur Berechnung des Bewegungsbeginns und der Geschiebetransportraten entwickelt (z.B. PAINTAL, 1971; ANDREWS & SMITH, 1992; HABERSACK, 2000; SUN & DONAHUE, 2000; PAPANICOLAOU ET AL., 2002). Die Funktionen, die die Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschreiben, sowie Abhängigkeiten der Funktionen von Strömungs- und Stabilitätszuständen sind jedoch immer noch weitestgehend unbekannt (MCEWAN & HEALD, 2001).

Die gebräuchlichen Modelle zur Berechnung der Sohlenstabilität und des Geschiebetransports basieren deshalb auf dem deterministischen Ansatz eines kritischen Schwellenwertes zwischen Ruhe und Bewegung. Die jeweils zu berücksichtigenden Faktoren sind dabei so vielfältig, dass sich zwei nicht unabhängige, aber doch separate Forschungszweige ausbildeten. Die folgende Aufbereitung der Literatur erfolgt deshalb getrennt für die Bereiche Sohlenstabilität und Geschiebetransport.

2.1 Sohlenstabilität

Die Gewässersohle setzt dem Strömungsangriff, ausgedrückt durch die Sohlenschubspannung

$$\tau_0 = \rho \cdot g \cdot h \cdot I_S, \quad (2.1)$$

einen Widerstand entgegen, der eine Funktion sedimentologischer (Korngröße d_K , Kornverteilung σ_g , Kornform, Dichte des Materials ρ_S , innerer Reibungswinkel φ), morphologischer (Verhältnis von Wassertiefe h zu Rauheitshöhe k , Sohlenneigung I_S , Sohlenstruktur) und hydraulischer Parameter (Dichte des Wassers ρ , Zähigkeit des Wassers ν) sowie der Erdbeschleunigung g ist. Der Sohlenwiderstand bzw. die Sohlenstabilität (um eine Verwechslung mit dem Fließwiderstand zu vermeiden) wird im allgemeinen durch die kritische Sohlenschubspannung τ_{0c} beschrieben, zu deren Berechnung in der Mehrheit der von SHIELDS (1936) entwickelte Ansatz verwendet wird. Zur Verbesserung der im Vergleich mit Messungen nicht immer guten Berechnungsergebnisse folgten SHIELDS (1936) zahlreiche Untersuchungen, die den Einfluss oben genannter Parameter gezielt analysierten. Der Shields-Ansatz sowie weitere den Bewegungsbeginn beeinflussende Faktoren werden im folgenden vorgestellt.

2.1.1 Der Shields-Ansatz

SHIELDS (1936) untersuchte erstmalig systematisch den Einfluss der Materialdichte ($\rho_S = 1060 - 4250 \text{ kg/m}^3$) und der Kornform (scharfkantig, kantig und natürlich gerundet) auf den Bewegungsbeginn einer ebenen, nahezu horizontalen Sohle. Die verwendeten Materialien mit Korngrößen zwischen 0,1 und 5 mm wiesen dabei jeweils sehr enge Sieblinien auf, so dass der einleitend erwähnte Effekt der Deckschichtbildung (Kap. 2.1.5) nicht untersucht worden war. Aus dem Kraftansatz am Einzelkorn folgt, bei Vernachlässigung der Liftkraft F_L , dass im Grenzzustand zwischen Ruhe und Bewegung die treibende Strömungskraft F_T im Gleichgewicht mit der haltenden Reibungskraft R_G ist. Für die Berechnung der dimensionslosen kritischen Sohlenschubspannung ergibt sich damit:

$$\tau_c^* = \frac{\tau_{0c}}{(\rho_S - \rho) \cdot g \cdot d_K} = \frac{\rho \cdot g \cdot h_c \cdot I_S}{(\rho_S - \rho) \cdot g \cdot d_K}, \quad (2.2)$$

wobei die Größe τ_c^* in der Literatur als kritischer Shields-Parameter bekannt ist. Die kritische Wassertiefe ist bei geringen Breiten-/Tiefenverhältnissen durch den auf die Sohle bezogenen hydraulischen Radius R_b und die Sohlenneigung I_S bei leicht ungleichmäßigem Abfluss durch die Energielinienneigung I_E zu ersetzen.

Die Ergebnisse seiner Experimente und weiterführenden Überlegungen fasste SHIELDS (1936) in der Schlussbemerkung zusammen, dass der Parameter τ_c^* lediglich eine Funktion der Korn-Reynolds-Zahl Re_K ist und präsentierte das in Abb. 2.3 dargestellte Diagramm. Die Korn-Reynolds-Zahl stellt dabei das Verhältnis des Korndurchmessers d_K zur Höhe der viskosen Grenzschicht δ_V dar (siehe Kap. 3.2.2). Über vollkommen rauen Sohlen, wenn die viskose Grenzschicht vernachlässigbar gering ist, ist ein Korn ganz der turbulenten Strömung ausgesetzt und der Shields-Parameter nimmt einen konstanten Wert an.

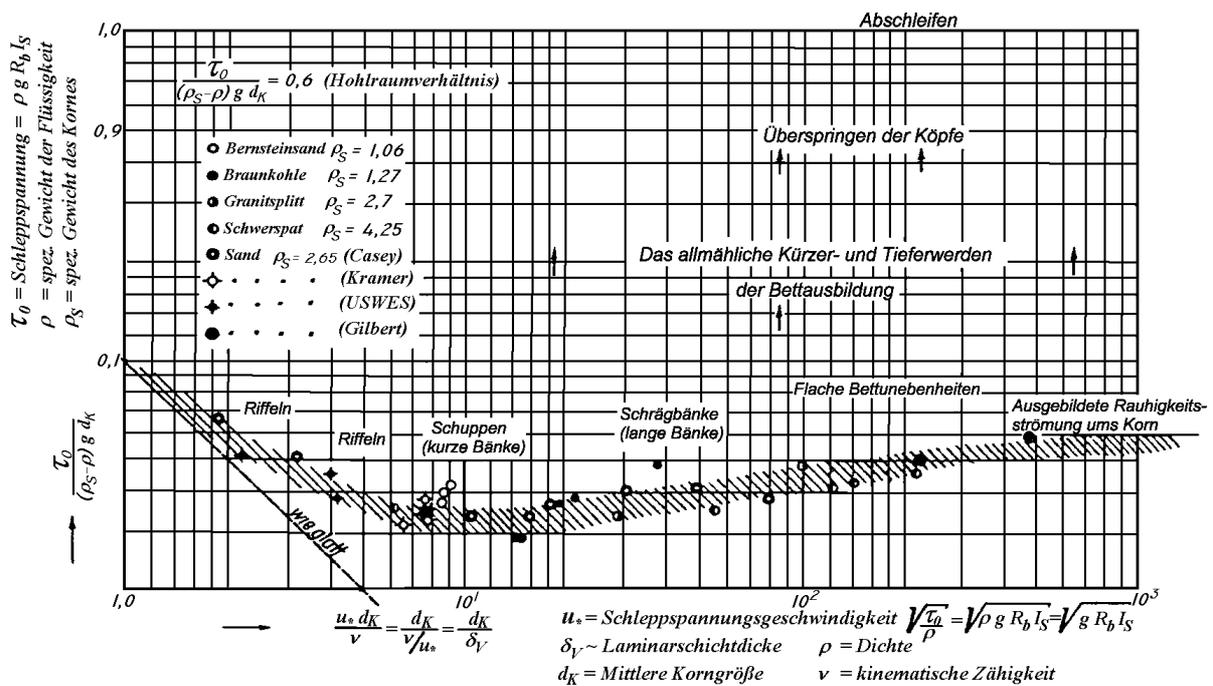


Abb. 2.3 Shields-Diagramm (aus SHIELDS, 1936) (die Nomenklatur wurde angepasst)

Abhängig von dem Verständnis des Begriffs „Bewegungsbeginn“ sind in der Literatur verschiedene Werte für τ_c^* zu finden, die BUFFINGTON & MONTGOMERY (1997) in einer umfassenden Studie über Forschungsarbeiten zum Bewegungsbeginn des letzten Jahrhunderts zusammengestellt haben. SHIELDS (1936) gibt für die Grenze zu absoluter Ruhe, d.h. auch kleinste Körner werden nicht transportiert, $\tau_c^* = 0,03$ an, empfiehlt aber den Wert 0,06 zu verwenden, bei dem laut GÜNTER (1971) bereits 50 % der Körner in Bewegung sind. Sehr weit verbreitet ist der Wert 0,047, der von MEYER-PETER & MÜLLER (1949) empfohlen wird.

Alleine diese Bandbreite deutet schon auf die Problematik in der Bestimmung des Bewegungsbeginns hin. Die Anwendung von Gl. (2.2) auf Naturdaten zeigt häufig die Notwendigkeit der Anpassung des Shields-Parameters auf die jeweiligen Gegebenheiten des Untersuchungsgebietes (siehe z.B. BUFFINGTON & MONTGOMERY, 1997). Der Arbeit von SHIELDS (1936) folgten deshalb zahlreiche Studien, in denen systematisch der Einfluss der einleitend genannten sedimentologischen und morphologischen Parameter untersucht worden ist.

2.1.2 Einfluss der Liftkraft

Die im Kraftansatz am Einzelkorn von SHIELDS (1936) nicht berücksichtigte Liftkraft F_L , die senkrecht von der Sohlenoberfläche weggerichtet wirkt, ist maßgeblich am Destabilisierungsprozess beteiligt (z.B. BEST, 1993). Zu ihrer Entstehung existieren zwei unterschiedliche Ansätze (DITTRICH, 1998). Dem ersten Ansatz zufolge resultiert die Liftkraft aus dem dynamischen Auftrieb, der durch unterschiedliche Geschwindigkeiten und die damit verbundene Druckdifferenz an der Ober- und Unterkante eines Partikels entsteht. Der zweite Ansatz führt die Liftkraft auf die Turbulenz der Strömung zurück. Demnach wird die Destabilisierung eines Kornes im wesentlichen von zur Sohle hin gerichteten sweeps beeinflusst, die Fluid höherer Geschwindigkeit in sohlennahe Regionen transportieren (siehe Kap. 3.2.4.3). DITTRICH ET AL. (1992) zufolge ist die Entstehung der Liftkraft von der Exponiertheit eines Kornes abhängig: bei einem deutlich aus der umgebenden Sohle herausragenden Korn entsteht sie durch den dynamischen Auftrieb, wohingegen die Liftkraft bei einem eben in die Sohle eingebetteten Korn turbulenzbedingt ist.

Nach neuesten Erkenntnissen von NELSON ET AL. (2000) trägt der Druckunterschied zwischen Kornober- und -unterseite zwar zur Entstehung des Lifts bei, kann aber nicht als einzige Ursache verantwortlich gemacht werden. Weiterhin stellen NELSON ET AL. (2000) die Begründung der Liftkraft anhand von sweeps in Frage, da diese eine nach unten gerichtete Liftkraft produzieren. Von der Sohle weg gerichtete ejections (Kap. 3.2.4.3), die Fluid geringerer Geschwindigkeit in Richtung Wasserspiegel transportieren, liefern nur einen schwachen aufwärtsgerichteten Lift. Der große Unterschied zwischen mittlerer Liftkraft und maximaler Liftkraft, die bis zum sechsfachen des Mittelwertes betragen kann, verdeutlicht jedoch, dass mittlere Strömungsgrößen wie z.B. ein Liftkraftbeiwert nicht zur Berechnung von F_L geeignet sind.

Die Bedeutung der Liftkraft im Hinblick auf den Bewegungsbeginn und damit auf die Stabilität einer Sohle konnten z.B. JÜPNER (1993) und PATNAIK ET AL. (1994) aus Untersuchungen am Einzelkorn nachweisen. JÜPNER (1993) zufolge nimmt das Verhältnis von Liftkraft F_L zu Strömungskraft F_T in Abhängigkeit des relativen Herausragens des Versuchskorns aus der umgebenden Sohle (Kap. 2.1.4) Werte von $F_L/F_T = 0,5 - 1,6$ an. Dabei ist die Liftkraft umso stärker am Bewegungsbeginn beteiligt, je tiefer das Korn eingebettet ist. PATNAIK ET AL. (1994) ermittelten in Windkanalversuchen $F_L/F_T = 0,1 - 2$, wobei das Verhältnis F_L/F_T mit zunehmender Rauheit abnimmt, was DITTRICH ET AL. (1996) in Versuchen im Wasserlabor ebenfalls beobachteten.

Allgemein anerkannt ist, dass die Liftkraft wesentlich zum Bewegungsbeginn einzelner Körner beiträgt und nicht anhand von mittleren Strömungsgrößen beschrieben werden kann, sondern stark vom lokalen Strömungsfeld abhängt. Die Ursachen der Liftkraft sind jedoch noch nicht geklärt.

2.1.3 Einfluss der Kornform

SHIELDS (1936) unterschied zwischen scharfkantigem, kantigem und natürlich gerundetem Material. Die Unterschiede im Bewegungsbeginn waren zwar sehr gering, jedoch vermutete er, dass bei sehr scharfkantigem Geschiebe eine etwas höhere kritische Schubspannung als bei kantigem bis abgerundetem Geschiebe zu erwarten ist.

CARLING ET AL. (1992) untersuchten den Einfluss der Kornform anhand von künstlichen Steinen verschiedener Form sowie zwei natürlichen Steinen (bezeichnet mit UP60 und UP130) über Sohlen unterschiedlicher Rauheitshöhe k . Die Sohlen bestanden aus dicht gelagertem Kies und Steinen der Fraktionen S1 = 16 - 32 mm, S2 = 40 - 64 mm bzw. S3 = 125 - 250 mm, die jeweils bis zur Hälfte der Kornhöhe in einer Zementschlemme eingebettet waren. Weiterhin überprüften sie, inwieweit die Ausrichtung der längsten Achse zur Hauptströmungsrichtung (parallel, quer, schräg) die zur Destabilisierung notwendige Sohlschubspannungsgeschwindigkeit u_{*c} beeinflusst. Die Ergebnisse ihrer Untersuchung sind in Abb. 2.4 zusammengestellt.

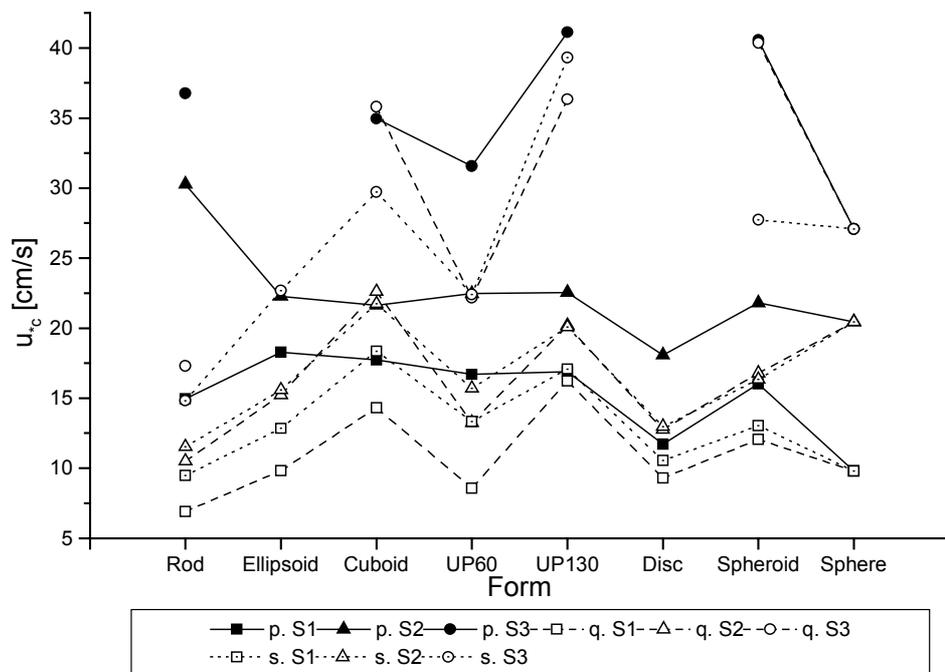


Abb. 2.4 Bewegungsbeginn in Abhängigkeit der Kornform (nach CARLING ET AL., 1992) (p . = parallel, q . = quer, s . = schräg zur Strömung)

Zunächst fällt auf, dass die zum Bewegungsbeginn erforderliche Strömungskraft, vermutlich aufgrund der größer werdenden Räume zwischen den Sohlenelementen, mit der Rauheitshöhe der Sohle steigt. Ein eindeutiger Einfluss der Kornform auf u_{*c} ist nicht feststellbar. Bei paralleler Ausrichtung der längsten Achse zur Hauptströmung scheint jedoch u_{*c} geringer zu werden je mehr sich die Kornform einer Kugel nähert. In beiden anderen Ausrichtungen ist der Trend umgekehrt, d.h. je mehr die Kornform einer Kugel ähnelt, desto größer ist der erforderliche Strömungsangriff zur Mobilisierung des Kornes. CARLING ET AL. (1992) schlussfolgerten, dass Ansätze zur Berechnung des Bewegungsbeginns Formparameter und Lagebedingungen enthalten sollten.

In diesen Grundsatzuntersuchungen konnte die Einbettung des beobachteten Kornes in eine ebenfalls mobile Sohle nicht berücksichtigt werden, sondern die untersuchten Steine bewegten sich über fixierte Sohlen. DITTRICH ET AL. (1992) führten Versuche durch, in denen der Bewegungsbeginn der gesamten Sohle untersucht wurde. Die Sohlen bestanden aus kugelförmigem und ellipsoidem Kies sowie plattigem Schiefer. Die Materialien wiesen sehr enge Sieblinien mit einer mittleren Korngröße von jeweils 8,6 mm auf. Mit der Definition des Bewegungsbeginns als „Übergang von der zufälligen Bewegung einzelner Körner zu einem mehr oder weniger kontinuierlichen Erosionsvorgang“ bestimmten DITTRICH ET AL. (1992) den kritischen Shields-Parameter des kugelförmigen Materials zu 0,037 und den des ellipsoiden Materials zu 0,04. Die geringfügig höhere Stabilität des ellipsoiden Kies begründeten sie mit der beobachteten dachziegelartigen Anordnung in Form kleiner Haufen bzw. Hügel. Diese Anordnung war für den sehr plattigen Schiefer stärker ausgeprägt. Die Untersuchung dieses Materials lieferte stark streuende Ergebnisse, die DITTRICH (2001) in einer Reanalyse der Daten auf die Versuchsdauer zurückführte. Während die Versuchsdauer auf den Bewegungsbeginn des kugel- und ellipsoiden Kies keine Auswirkungen hat, nimmt τ_c^* von 0,038 bei kurzer Versuchsdauer auf 0,027 bei langem Versuch mit dem plattigen Material ab. Der Grund liegt in der Ausbildung der Hügel. Zunächst ordnen sich die Partikel dachziegelartig an und bilden immer höher werdende Hügel. Die Unebenheit der Sohle nimmt zu bis ein Hügel zusammenbricht und einen Dominoeffekt auslöst, durch den die ganze Sohle in Bewegung gerät.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass weniger die Form an sich als vielmehr die mit der Form verbundene Ausbildung von Deckwerksstrukturen (z.B. die Dachziegelstruktur), auf die in Kap. 2.1.5 näher eingegangen wird, für den Bewegungsbeginn von Bedeutung ist.

2.1.4 Einfluss der Exponiertheit - Kornmischungen

Das relative Herausragen eines betrachteten Kornes aus der umgebenden Sohle wurde bereits bei der Behandlung der Liftkraft als destabilisierender Faktor (Kap. 2.1.2) erwähnt. Gezielte Untersuchungen zum Einfluss des

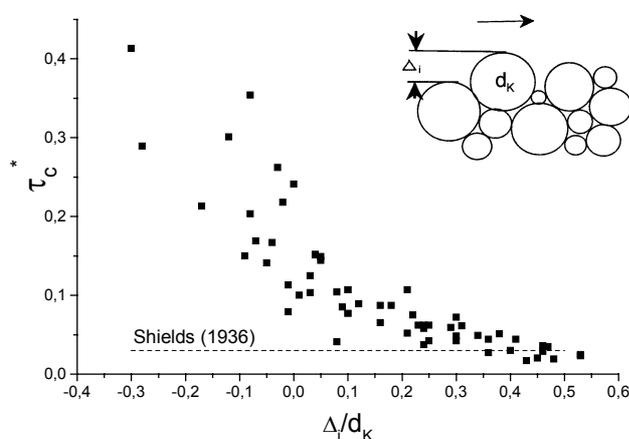


Abb. 2.5 Einfluss des relativen Herausragens auf den Bewegungsbeginn (nach FENTON & ABBOTT, 1977)

relativen Herausragens eines Kornes führten FENTON & ABBOTT (1977) durch. Die aus den Versuchen mit einer vollkommen rauhen Sohle gewonnenen Ergebnisse sind in Abb. 2.5 dargestellt. Der von FENTON & ABBOTT (1977) definierte Bewegungsbeginn entspricht der ersten Bewegung des Kornes, so dass er mit dem von SHIELDS (1936) angegebenen Wert $\tau_c^* = 0,03$ vergleichbar ist. Nach Abb. 2.5 erreicht τ_c^* diesen Wert, wenn das Versuchskorn um mindestens 35 % seiner Größe d_K aus der umgebenden Sohle herausragt. Für eben in die Sohle einge-

bettete Körner ermittelten FENTON & ABBOTT (1977) τ_c^* zu 0,1 bis 0,15. Liegt das betrachtete Korn tiefer als die umgebenden Partikel, dann kann der kritische Shields-Parameter sogar bis $\tau_c^* \approx 0,4$ betragen. Implizit enthält also der von SHIELDS (1936) ermittelte Wert 0,03 das relative Herausragen der Körner um $\Delta_i/d_K \approx 0,35 - 0,45$.

WU ET AL. (2000) schlagen zur Berücksichtigung des relativen Herausragens eines Kornes aus der umgebenden Sohle einen Korrekturfaktor vor, der auf einer gleichförmigen Wahrscheinlichkeitsverteilung des Herausragens Δ_i basiert. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Partikel d_j der Fraktion j vor einem Partikel d_i liegt, ist gleich p_{bj} und entspricht vermutlich dem prozentualen Gewichtsanteil Δ_j der Fraktion j . Die Wahrscheinlichkeit eines Partikels d_i höher bzw. niedriger als ein Partikel d_j zu liegen, ist dann für eine Fraktion:

$$\text{höher: } p_{ei,j} = p_{bj} \cdot \frac{d_i}{d_i + d_j} \quad \text{niedriger: } p_{hi,j} = p_{bj} \cdot \frac{d_j}{d_i + d_j} \quad (2.3a)$$

bzw. für die ganze Kornmischung:

$$\text{höher: } p_{ei} = \sum_{j=1}^n p_{bj} \cdot \frac{d_i}{d_i + d_j} \quad \text{niedriger: } p_{hi} = \sum_{j=1}^n p_{bj} \cdot \frac{d_j}{d_i + d_j} \quad (2.3b)$$

Mit dem experimentell zu bestimmenden Exponenten β_{WU} berechnet sich der kritische Shields-Parameter für Kornmischungen nach WU ET AL. (2000) zu:

$$\tau_{c,i}^* = \tau_c^* \cdot \left(\frac{p_{ei}}{p_{hi}} \right)^{\beta_{WU}} \quad (2.4)$$

Für den Exponenten geben WU ET AL. (2000) den Wert $\beta_{WU} = -0,6$ an, wobei sie $\tau_c^* = 0,03$ angenommen hatten.

Das relative Herausragen eines betrachteten Kornes bzw. seine Einbettung in die umgebende Sohle gewinnt bei der Bestimmung des Bewegungsbeginns von Kornmischungen an Bedeutung. Zwar könnte die zum Bewegungsbeginn führende Schubspannung nach Gl. (2.2) für jede Fraktion einzeln berechnet werden, jedoch beeinflussen sich die verschieden großen Körner gegenseitig z.B. im Hinblick auf das relative Herausragen. Dieser Effekt wird im Englischen mit „hiding and exposure“ bezeichnet. Kleinere Körner können im Strömungsschatten größerer liegen und dadurch einem größeren Strömungsangriff standhalten. Andererseits ragen größere Körner stärker aus der Sohle heraus und erfahren somit einen stärkeren Strömungsangriff. Die Mobilität größerer Partikel innerhalb einer Kornmischung wird zusätzlich dadurch erhöht, dass durch den Transport der feineren Fraktionen den gröbereren die Grundlage entzogen wird (WILCOCK & MCARDELL, 1993). Zur Berücksichtigung des unterschiedlichen Verhaltens von Einkorn- und Mischkornsohlen wurden zahlreiche Ausgleichsfunktionen (engl.: hiding function) aufgestellt, von denen einige im folgenden vorgestellt werden.

Zuvor sollen jedoch die im Zusammenhang mit Kornmischungen verwendeten Größen vorgestellt werden. Die Zusammensetzung mehrerer Fraktionen i wird als Kornmischung bezeichnet, wenn die geometrische Standardabweichung der Sieblinie σ_g einen Grenzwert überschreitet, den SCHÖBERL (1981) zu 1,35 angibt:

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} > 1,35. \quad (2.5)$$

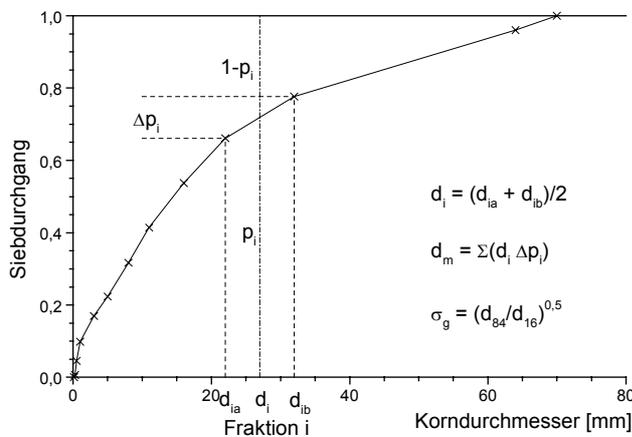


Abb. 2.6 Parameter einer Sieblinie

Hierin sind d_{16} und d_{84} die Korndurchmesser bei 16 resp. 84 % Siebdurchgang. Der prozentuale Gewichtsanteil der jeweiligen Fraktion i ist Δp_i . Jede Fraktion wird durch einen zugehörigen Korndurchmesser d_i charakterisiert, der das Mittel zwischen den Grenzen der Fraktionen angibt (siehe Abb. 2.6). Zur Beschreibung der gesamten Kornmischung wird, neben dem Korndurchmesser bei 50 % Siebdurchgang d_{50} , meistens der nach MEYER-PETER & MÜLLER (1949) berechnete mittlere Korndurchmesser d_m verwendet:

$$d_m = \sum_{i=1}^n d_i \cdot \Delta p_i. \quad (2.6)$$

EGIAZAROFF (1965) stellte bereits fest, dass in einer Kornmischung die zum Bewegungsbeginn führende Schubspannung der Fraktionen mit $d_i > d_{50}$ geringer ist als bei Einkornsohlen der entsprechenden Größe d_i , wohingegen zur Mobilisierung der Fraktionen mit $d_i < d_{50}$ höhere Schubspannungen als bei entsprechenden Einkornsohlen benötigt werden. Zur Berechnung des kritischen Shields-Parameters der Fraktion i einer Kornmischung empfiehlt EGIAZAROFF (1965) folgende Gleichung:

$$\tau_{c\ i}^* = \frac{0,1}{\left(\log \left(19 \frac{d_i}{d_{avg}} \right) \right)^2}, \quad (2.7)$$

wobei d_{avg} der Mittelwert aus dem mittleren Korndurchmesser des bewegten Materials und dem des Sohlenmaterials ist. Ausgehend von $\tau_{c\ i}^* = 0,06$ für d_{avg} wird der kritische Shields-Parameter für gröberes und feineres Material verringert bzw. erhöht.

WILCOCK & SOUTHARD (1988) untersuchten den Einfluss der Sieblinienbreite ($\sigma_g \approx 1,15 - 4,9$) auf den fraktionsweisen Bewegungsbeginn. Sie bestätigten das Ergebnis von EGIAZAROFF (1965), wonach das Verhältnis zwischen dem Korndurchmesser der betrachteten Fraktion d_i und einem die Kornmischung charakterisierenden Durchmesser, sie wählten den Korndurchmesser bei 50 % Siebdurchgang d_{50} , ausreicht, um die Mobilitätsunterschiede in Mischungen zu erfassen. Laut WILCOCK & SOUTHARD (1988) sind also die Weite der Sieblinie wie auch der prozentuale Gewichtsanteil der einzelnen Fraktionen vernachlässigbar. Neuesten Untersuchungen von SHVIDCHENKO ET AL. (2001) zufolge sollte jedoch neben dem d_{50} auch die geometrische Standardabweichung der Sieblinie σ_g berücksichtigt werden.

HUNZIKER (1995) führte zur Entwicklung einer Formel für die fraktionsweise Berechnung des Geschiebetransports (siehe Gl. 2.23) folgenden Ansatz ein:

$$\tau_{c\ i}^* = \alpha_H \cdot \left(\frac{d_i}{d_{mS}} \right)^{-\beta_H} \cdot \tau_c^* , \quad (2.8)$$

wobei

$$\beta_H = 0,011 \cdot \left(\tau_m^* \cdot \left(\frac{k_{St}}{k_r} \right)^{1,5} \right)^{-1,5} - 0,3$$

und α_H eine Konstante mit dem Wert 0,73 ist. Für τ_c^* nahm HUNZIKER (1995) den Wert 0,05 an. Als charakteristischen Durchmesser der Kornmischung verwendete er den mittleren Korndurchmesser d_m nach Gl. (2.6), den er auf die oberste Sohlenschicht (Index S) bezog. Dieser Durchmesser wird auch zur Berechnung der aktuellen dimensionslosen Schubspannung τ_m^* nach Gl. (2.2) herangezogen, wobei statt der zum Bewegungsbeginn führenden Wassertiefe h_c die tatsächlich vorliegende Wassertiefe h verwendet wird. Der Faktor $(k_{St}/k_r)^{1,5}$ wurde von MEYER-PETER & MÜLLER (1949) zur Berücksichtigung von Sohlenunebenheiten, wie z.B. Transportkörpern, eingeführt. In Verbindung mit der Energielinienneigung I_E ist er als Kornreibungsgefälle I' bekannt:

$$I' = I_E \cdot \left(\frac{k_{St}}{k_r} \right)^{1,5} . \quad (2.9)$$

Hierin sind k_{St} der Strickler-Beiwert unter Berücksichtigung von Sohlenunebenheiten, berechnet nach der Gauckler-Manning-Strickler Formel

$$u_m = \frac{Q}{B_R \cdot h} = k_{St} \cdot R^{2/3} \cdot I_S^{1/2} , \quad (2.10a)$$

und k_r der auf das Korn bezogene Strickler-Beiwert, für den MEYER-PETER & MÜLLER (1949) folgende Beziehung angeben:

$$k_r = \frac{26}{\sqrt[6]{d_{90}}} . \quad (2.10b)$$

Der Wert von d_{90} ist dabei in [m] anzugeben.

Aufgrund des in der Natur beobachteten unterschiedlichen Bewegungsbeginns feiner und grober Fraktionen (z.B. KUHNLE, 1993) unterschied WILCOCK (1993) neben der Einteilung in Einkorn- und Mischkornsohlen, entsprechend der Häufigkeitsverteilung des Sohlenmaterials, zwischen unimodalen und bimodalen Kornverteilungen. Anhand von Laborversuchen beobachtete WILCOCK (1993), dass im Fall unimodaler Kornverteilungen der Bewegungsbeginn unabgänglich von der Korngröße ist und durch den d_m beschrieben werden kann (Abb. 2.7a). Im Fall bimodaler Kornmischungen werden hingegen die kleineren Fraktionen bei deutlich geringeren Schubspannungen bewegt als die größeren Fraktionen (Abb. 2.7b).

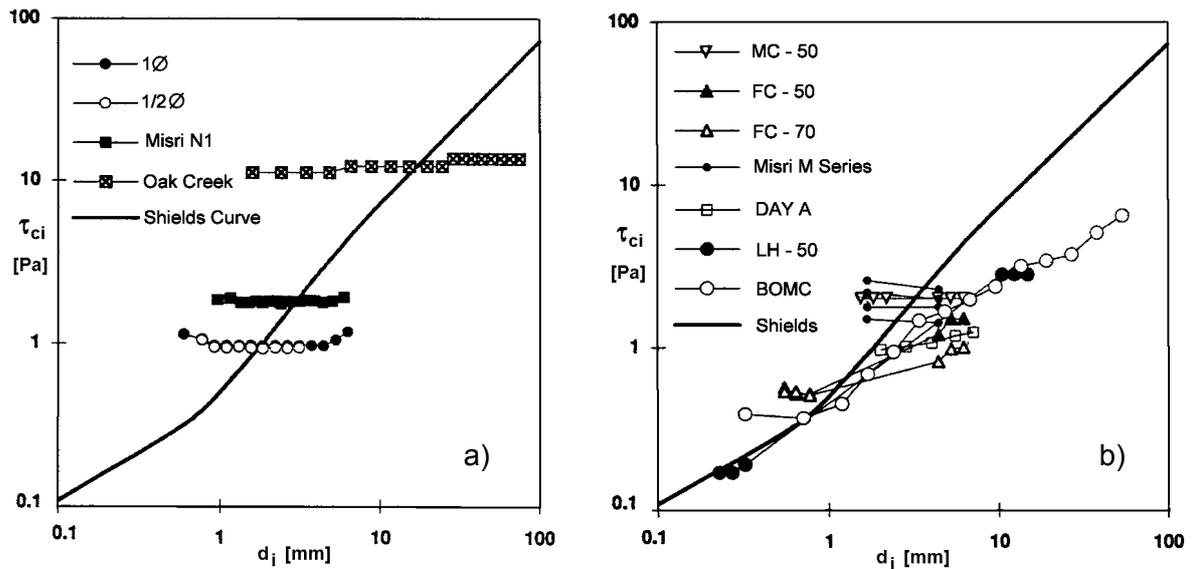


Abb. 2.7 Bewegungsbeginn der Fraktionen a) unimodaler Kornmischungen und b) bimodaler Kornmischungen (WILCOCK, 1993)

Die vorgestellten Ansätze basieren auf Versuchen, die zwar mit geringen Geschiebetransportraten, aber dennoch bei Transport durchgeführt worden sind. Eine wesentliche Eigenschaft von Sohlen aus Kornmischungen, die Selbststabilisierung durch Ausbildung von Deckschichten (Abb. 2.1), wurde also nicht untersucht. Da das Thema des übergeordneten Kapitels die Sohlenstabilität ist, womit der weitestgehend immobile Zustand einer Sohle gemeint ist, wird im folgenden Abschnitt die Entwicklung statischer Deckschichten behandelt. Zur Ausbildung mobiler Deckschichten wird auf Kap. 2.2.1 verwiesen.

2.1.5 Statische Deckschichten

Grundvoraussetzung für die Ausbildung statischer Deckschichten ist eine ausreichend weite Sieblinie des Sohlenmaterials, d.h. $\sigma_g > 1,35$ (Gl. 2.5). Weitere Randbedingungen sind zum einen ein zu vernachlässigender Geschiebeeintrag von oberstrom und zum anderen, dass die Mittelwerte der Wahrscheinlichkeitsverteilungen von Strömungsangriff und Sohlenwiderstand ausreichend weit voneinander entfernt sind (siehe Abb. 2.2). Durch nach unterstrom gerichtete selektive Erosion kleinerer Körner erfolgt dann eine Anreicherung der größeren Körner an der Sohlenoberfläche, die das darunter befindliche *Unterschichtmaterial*, oder die *Ausgangsmischung* wie es im Labor genannt wird, vor dem Strömungsangriff schützen (Abb. 2.8). Die oberste, Ein-Korn dicke Schicht der Sohle von der Stärke des Maximalkorns d_{max} wird als *statische Deckschicht* bezeichnet. Die Sieblinie der Deckschicht weist dabei alle in der Ausgangsmischung enthaltenen Fraktionen auf, jedoch mit veränderten Gewichtsanteilen.



Abb. 2.8 Aufgenommene Deckschicht der Rheinsohle (Photo: Gölz, BfG Koblenz)

Wie bereits einleitend erwähnt, gibt es eine obere Grenze bei der sich statische Deckschichten ausbilden können (Abb. 2.1). Wird diese Grenze überschritten, reißt die Deckschicht auf und die Sohle kann sich bei anhaltend hohem Strömungsangriff erst durch einen entsprechenden Gefälleverlust auf einem niedrigeren Niveau, d.h. durch Tiefenerosion, erneut stabilisieren. Dieser Grenzzustand wird *Zustand maximaler Sohlenstabilität* genannt. Die Kornverteilung der zu diesem Zustand gehörenden Deckschicht ist eine Funktion des Unterschichtmaterials und kann nach GÜNTER (1971) wie folgt berechnet werden:

$$\Delta p_{(D_x)j} = \frac{\Delta p_{(D_f)j} \left(\frac{\Delta p_{(A_x)j}}{\Delta p_{(A_f)j}} \right) \left(\frac{1 - p_{(A_f)j}}{1 - p_{(A_x)j}} \right)}{\sum_{i=1}^n \left[\Delta p_{(D_f)j} \left(\frac{\Delta p_{(A_x)j}}{\Delta p_{(A_f)j}} \right) \left(\frac{1 - p_{(A_f)j}}{1 - p_{(A_x)j}} \right) \right]} \quad (2.11)$$

mit: $\Delta p_{(A_f)j} = \sqrt{\frac{d_i}{d_{\max}}}$ und $\Delta p_{(D_f)j} = 0,67 \cdot \left(\frac{d_i}{d_{\max}} \right)^3 + 0,33 \frac{d_i}{d_{\max}}$

Δp_i und $1 - p_i$ sind in Abb. 2.6 definiert. Die weiteren Indizes bedeuten: A_x = Sieblinie der Ausgangsmischung, D_x = Sieblinie der Deckschicht im Zustand maximaler Sohlenstabilität, A_f = Sieblinie der Fullerkurve, die die Kornverteilung mit der größtmöglichen Lagerungsdichte beschreibt, und D_f = Sieblinie der zur Fullerkurve gehörenden Deckschicht.

Unter natürlichen Bedingungen wird die maximale Sohlenstabilität praktisch nie erreicht, da hierzu entweder über lange Zeit konstante Durchflüsse erforderlich sind oder aber Strömungsangriffe, die jeweils nur knapp oberhalb der aktuellen Sohlenstabilität liegen. Die Verwendung von Ansätzen, die den Zustand maximaler Sohlenstabilität untersuchten, führen daher in den meisten Fällen zu einer Überschätzung der aktuellen Sohlenstabilität (z.B. GÜNTER, 1971; SCHÖBERL, 1979, 1992a; CHIN, 1985). Ansätze, die auf der Grundlage von sehr engen Sieblinien (SHIELDS, 1936) oder ohne die Berücksichtigung einer Deckschichtbildung (MEYER-PETER & MÜLLER, 1949; WILCOCK, 1996a und b) entwickelt wurden, unterschätzen hingegen die Stabilität der vorhandenen Sohle. Tatsächlich befinden sich die meisten natürlichen Gewässersohlen in einem *stabilen Zwischenzustand*. Lediglich SCHÖBERL

(1992b) untersuchte gezielt diesen Zustand, aber auch die Ansätze von GESSLER (1965) und PARKER & KLINGEMAN (1982) lassen sich zur Berechnung der Sohlenstabilität im stabilen Zwischenzustand heranziehen. Die genannten Ansätze sind der Klassierung entsprechend in Tab. 2.1 aufbereitet. Die den einzelnen Theorien zugrunde liegenden Untersuchungen sind ausführlich in DITTRICH (1998) aufbereitet.

Tab. 2.1 Klassierung vorhandener Stabilitätsansätze entsprechend dem Stabilitätszustand einer Sohle (nach DITTRICH, 1998)

Sohlenstabilität	Ansatz	Autor
keine Deckschicht	<u>Einkornmaterial</u> $\tau_{0c} = 0,06 \cdot (\rho_S - \rho) \cdot g \cdot d_{50}$	SHIELDS (1936)
	<u>Kornmischungen</u> $\tau_{0c} = 0,047 \cdot (\rho_S - \rho) \cdot g \cdot d_m$	MEYER-PETER & MÜLLER (1949)
	$\tau_{0c} = 0,035 \cdot (\rho_S - \rho) \cdot g \cdot d_{50}$	WILCOCK ET AL. (1996a und b)
Deckschicht im stabilen Zwischenzustand	$\tau_{0c} = 0,047 \cdot (\rho_S - \rho) \cdot g \cdot d_{mZ}$	GESSLER (1965)
	$\tau_{0c} = \left(\frac{d_{mZ} - d_m}{d_{mD} - d_m} \right)^{2/3} \cdot \tau_{0cmax}$	SCHÖBERL (1992b)
	$\tau_{0c} = 0,035 \cdot (\rho_S - \rho) \cdot g \cdot d_{50Z}$	PARKER & KLINGEMAN (1982)
Deckschicht im Zustand maximaler Sohlenstabilität	$\tau_{0c} = \lambda_G \cdot 0,047 \cdot (\rho_S - \rho) \cdot g \cdot d_{max}$ mit: $\lambda_G = \left(\frac{d_{mD}}{d_{max}} \right)^{0,64} \cdot \left(\frac{d_m}{d_{max}} \right)^{0,33}$	GÜNTER (1971)
	$\tau_{0cmax} = Fr_{*c} \cdot (\rho_S - \rho) \cdot g \cdot d_{mD}$ mit: $Fr_{*c} = \frac{0,6^2}{a_S \cdot Fr_g^2}$; $a_S = \left(\frac{d_{g0}}{d_{50}} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{d_m}{d_{50}} \right)^{1/2}$ $Fr_g^2 = \frac{u_m^2}{(\rho_S / \rho - 1) \cdot g \cdot d_{mD}}$	SCHÖBERL (1979, 1992a)
	$\tau_{0c} = 0,045 \cdot (\rho_S - \rho) \cdot g \cdot d_{g0}$	MEYER-PETER & MÜLLER (1949)
	$\tau_{0c} = Fr_{*c} \cdot (\rho_S - \rho) \cdot g \cdot d_{50D}$ mit: $d_{50D} = d_{max} / 1,8$	CHIN (1985)
	$Fr_{*c} = 0,05 \cdot \left[0,4 \cdot \left(\frac{d_{50D}}{d_{50}} \right)^{-1/2} + 0,6 \right]^2$	

Das Klassierungskonzept wurde von KOLL & DITTRICH (1999) anhand von Naturdaten deutscher Mittelgebirgsflüsse überprüft und bestätigt. Die Gewässer wurden anhand der Kornverteilungen von Unterschicht- und Deckschichtmaterial in lockere, zwischenstabile und maximal stabile Abschnitte eingeteilt und der Bewegungsbeginn aus gemessenen Geschiebetransportraten bestimmt. Abb. 2.9 zeigt beispielhaft die Ergebnisse für den untersuchten Bereich der Elbe, die in einen maximal stabilen Abschnitt (km 112 bis 142), einen zwischenstabilen (km 142 bis 160) und einen lockeren Abschnitt (km 160 bis 216) unterteilt werden kann. Neben dem aus den Naturdaten für jeden Abschnitt ermittelten Bewegungsbeginn sind die nach Tab. 2.1 berechneten kritischen Sohlschubspannungen dargestellt. Die Anwendung aller Ansätze liefert z.B. für den maximal stabilen Abschnitt kritische Sohlschubspannungen zwischen 5 und 35 N/m². Durch die Berücksichtigung der Deckschichtbildung und den Stabilitätszustand kann die Streubreite auf $\tau_{0c} = 20$ bis 35 N/m² reduziert werden. Aus den Naturdaten konnte die kritische Schubspannung in diesem Fall zwar nicht exakt bestimmt werden, liegt aber in jedem Fall höher als 18,6 N/m².

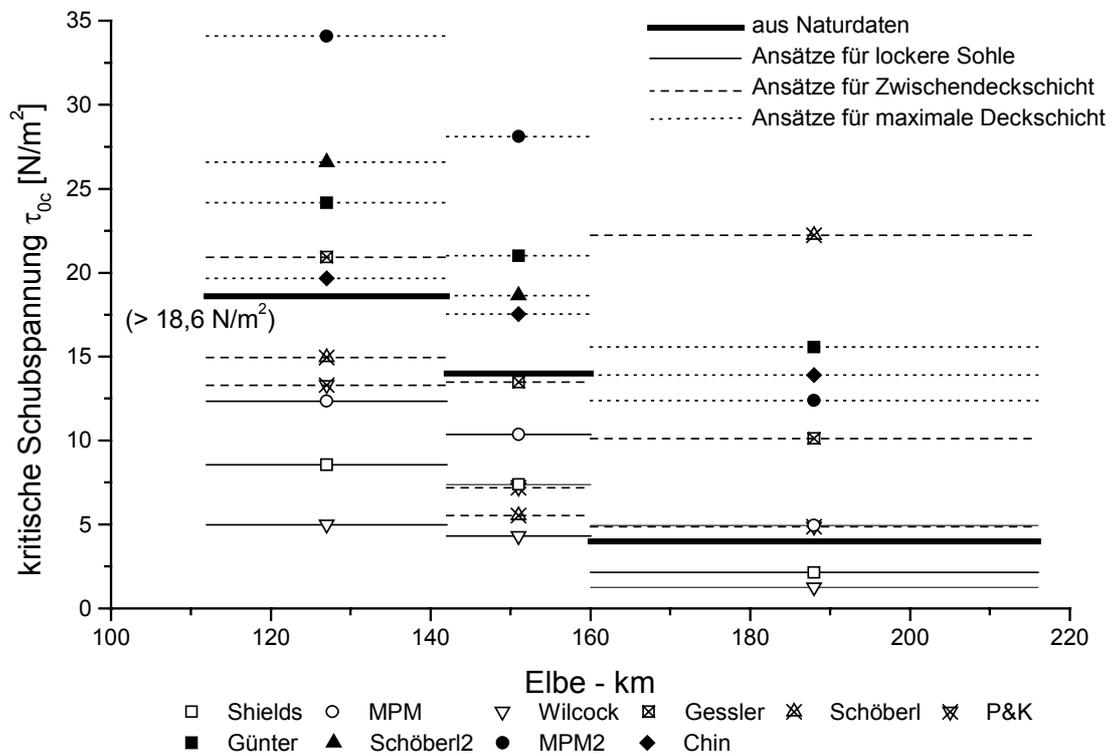


Abb. 2.9 Vergleich zwischen berechnetem und gemessenem Bewegungsbeginn entsprechend der Unterteilung nach Tab. 2.1 (nach KOLL & DITTRICH, 1999)

Darüber hinaus stellten KOLL & DITTRICH (1999) fest, dass durch die Berücksichtigung der Form der Häufigkeitsverteilung des Sohlenmaterials die Abweichung der berechneten von den gemessenen kritischen Schubspannungen weiter reduziert werden kann. Der Ansatz von GESSLER (1965), der anhand unimodaler Kornmischungen aufgestellt wurde, schätzt die Stabilität unimodaler Natursohlen besser ab, als der von PARKER & KLINGEMAN (1982) für bi- und multimodale Kornverteilungen entwickelte Ansatz. Abb. 2.10 verdeutlicht die Änderung der Häufigkeitsverteilung der Sieblinie des Oberflächenmaterials in Abhängigkeit von den

verschiedenen Stadien der Deckschichtausbildung. Dargestellt sind die Sieblinie und die Häufigkeitsverteilung der Unterschicht A_x und der Deckschicht im stabilen Zwischenzustand Z_x der Elbe bei Wittenberg/Lutherstadt (km 214,1) sowie die zugehörige, nach GÜNTER (1971) (Gl. 2.11) berechnete Sieblinie der Deckschicht bei maximaler Sohlenstabilität D_x . Der d_{50Z} der zwischenstabilen Deckschicht ist ca. viermal so groß wie der d_{50} der Unterschicht und der d_{50D} der maximalen Deckschicht sogar ca. 17 mal so groß. Aufgrund der linearen Beziehung zwischen der zum Bewegungsbeginn führenden Sohlenschubspannung τ_{0c} und dem charakteristischen Korndurchmesser (Gl. 2.2) bedeutet dies, dass die Stabilität des Sohlenmaterials Z_x ebenfalls viermal und die des maximalen Deckschichtmaterials sogar 17 mal größer ist als die Stabilität des Unterschichtmaterials.

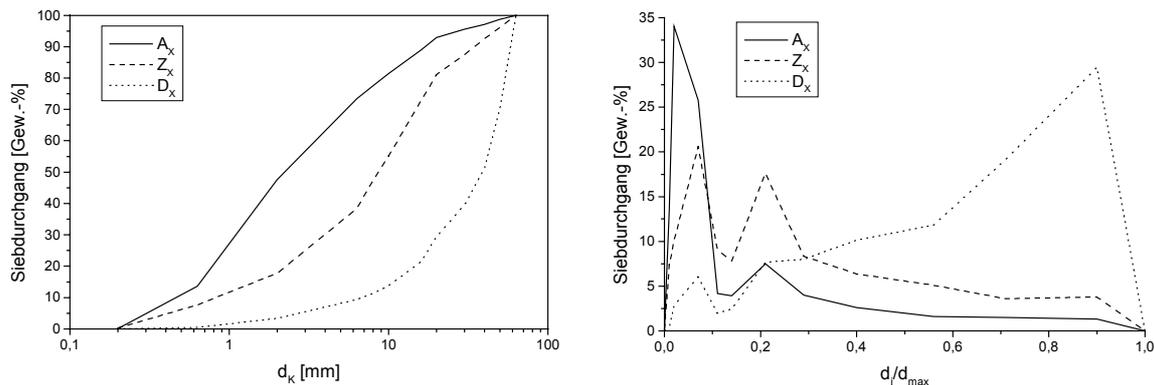


Abb. 2.10 a) Sieblinien des Unterschichtmaterials A_x und der Deckschicht im stabilen Zwischenzustand Z_x sowie der maximalen Deckschicht D_x der Elbe bei Wittenberg/Lutherstadt
b) Häufigkeitsverteilungen von A_x , Z_x und D_x

Der Berücksichtigung der durch die Deckschichtbildung veränderlichen Sieblinie kommt also bei der Diskussion der Stabilität einer Sohle, die eine entsprechend weite Sieblinie ($\sigma_g > 1,35$) aufweist, eine maßgebliche Rolle zu. In steiler werdenden Gewässern, in denen die Bandbreite der vorhandenen Kornfraktionen zunimmt, bilden sich neben statischen Deckschichten morphologische Strukturen aus, wodurch die Stabilität der Sohle erhöht wird. Der Einfluss der Neigung ist deshalb in Verbindung mit dem Einfluss von Sohlenstrukturen zu betrachten.

2.1.6 Einfluss der Neigung und der Sohlenstruktur

Für steile Gewässer liefert der Kraftansatz unter Berücksichtigung der von SHIELDS (1936) vernachlässigten Liftkraft F_L (ROSPORT, 1998; ABERLE, 2000):

$$\tau_c^* = \frac{\tau_{0c}}{(\rho_S - \rho) \cdot g \cdot d_K} = \frac{c_1}{c_2} \cdot (\cos \alpha \cdot \tan \varphi - \sin \alpha) - \frac{F_L \cdot \tan \varphi}{c_2 \cdot (\rho_S - \rho) \cdot g \cdot d_K^3}, \quad (2.12)$$

wobei die Beiwerte c_1 und c_2 die Abweichung der Kornform von einem Würfel berücksichtigen. α ist der Neigungswinkel der Sohle und φ der innere Reibungswinkel. Die zum Bewegungsbeginn führende Sohlenschubspannung τ_{0c} wird um den Faktor $1/(\cos \alpha \cdot \tan \varphi - \sin \alpha)$ verringert, d.h. je weiter sich die Sohlenneigung dem inneren Reibungswinkel nähert, desto geringer ist die zur Mobilisierung erforderliche Strömungskraft. Stabilisierend wirkt jedoch neben der statischen Deckschicht (Kap. 2.1.5) die mit der Weite der Sieblinie und der Steil-

heit der Gewässersohle verbundene Ausbildung morphologischer Strukturen, wie z.B. die in Abb. 2.11 dargestellten Cluster, Ringstrukturen, Riffel-Pools und Step-Pools (z.B. ROSPORT, 1998; ABERLE, 2000; KOZLOWSKI, 2000). Die Anordnung der Grobkomponenten des Sohlenmaterials zu stabilen Strukturen bewirkt in den beiden erstgenannten Fällen eine erhöhte Sohlenrauheit, wodurch der Fließwiderstand steigt. Der Oberflächenwiderstand verliert gegenüber dem bedeutender werdenden Formwiderstand, der zusätzlich durch das abnehmende Verhältnis von Wassertiefe zu Rauheitshöhe verstärkt wird, an Gewicht. In entsprechend steilen Gewässern treten übergeordnete Systemrauheiten hinzu. Durch die treppenähnlichen Riffel-Pool- (Neigungsbereich $\sim 2 - 8 \%$) und Step-Pool-Systeme (etwa ab 8% Sohlenneigung) wird die Gesamtneigung des Gewässers reduziert. ZIMMERMANN & CHURCH (2001) stellten anhand von Naturmessungen fest, dass die Verwendung der in den Pools gemessenen Sohlenneigung eine bessere Abschätzung der kritischen Strömungsverhältnisse liefert als eine über einen größeren Abschnitt gemittelte Neigung.

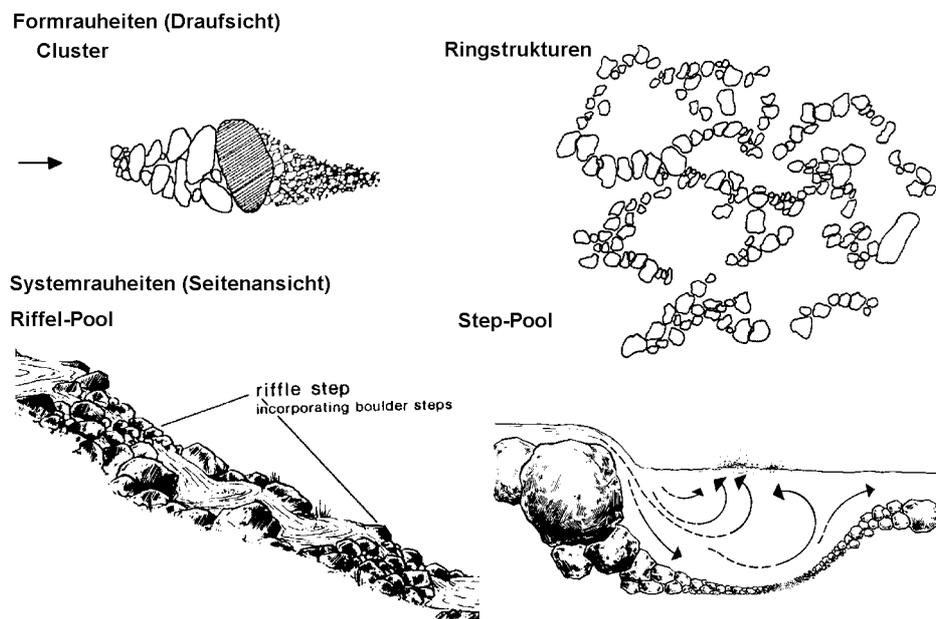


Abb. 2.11 Skizze morphologischer Strukturen in steilen Gewässern (aus DE JONG, 1995; TAIT & WILLETTS, 1992; HAYWARD, 1980)

Bedingt durch die im Verhältnis zur Wassertiefe großen Rauheitselemente und die Sohlenstrukturen treten häufig Fließwechsel zwischen strömendem und schießendem Abfluss auf, die mit der Einmischung von Luft verbunden sind. Unter besonderer Berücksichtigung der Luftereinmischung entwickelte SCHEUERLEIN (1968) einen Ansatz zur Berechnung der zum Bewegungsbeginn führenden Fließgeschwindigkeit (HARTUNG & SCHEUERLEIN, 1970):

$$u_c = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot (\rho_S - \rho)}{\sigma_{\text{Luft}} \cdot \rho}} \cdot d_K \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \cos \alpha \cdot (\tan \varphi - \tan \alpha)} \quad (2.13a)$$

mit
$$\sigma_{\text{Luft}} = 1 - 1,3 \cdot \sin \alpha + 0,08 \cdot \frac{3 \cdot h}{d_K}.$$

Für den zweiten Faktor kann der konstante Wert 1,2 angenommen werden und der Luftbeimischungskoeffizient σ_{Luft} ist für Sohlengefälle kleiner als 20% vernachlässigbar. Mit dem

mittleren Korndurchmesser d_m als charakteristische Korngröße vereinfacht sich Gl. (2.13a) dann zu (SCHEUERLEIN, 1999):

$$u_c = 1,2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot (\rho_s - \rho)}{\rho}} \cdot d_m \quad (2.13b)$$

Aufgrund der sehr unregelmäßigen Querprofile gestaltet sich die Bestimmung der Wassertiefe h in Gebirgsbächen häufig sehr schwierig. Stabilitätsansätze für Gebirgsbäche werden deshalb meistens in der von SCHOCKLITSCH (1962) eingeführten Form dargestellt:

$$\frac{q_c}{\sqrt{g \cdot k^3}} = f\left(\text{const.}, \frac{\rho_s - \rho}{\rho}, I_s\right), \quad (2.14)$$

worin q_c der zum Bewegungsbeginn führende spezifische Durchfluss, g die Erdbeschleunigung, k ein Maß für die Rauheitshöhe, const. eine empirisch ermittelte Konstante, ρ_s die Dichte des Sediments, ρ die Dichte des Wassers und I_s die Sohlenneigung ist. Für den Parameter k , der an sich in dieser Arbeit als absolute Rauheitshöhe bezeichnet wird, wird im allgemeinen ein charakteristischer Korndurchmesser (häufig d_{65}) der jeweils vorhandenen Deckschicht angenommen. Der Durchfluss kann in Gebirgsbächen mit Hilfe der Salzverdünnungsmethode (siehe z.B. ROSPORT, 1998) gemessen werden, ohne dass das lokale Geschwindigkeitsprofil oder die Wassertiefe bekannt sein müssen.

In der Literatur vorhandene Ansätze sind ausführlich in den Arbeiten von ABERLE (2000) und PALT (2001) aufbereitet und ausgewertet, weshalb hier nur diese beiden Ansätze vorgestellt werden. ABERLE (2000) definierte auf der Basis von Laboruntersuchungen speziell zu Step-Pool-Systemen die Standardabweichung der Sohlenerhebung s als weitaus besser geeignetes Maß der Sohlenrauheit als einen charakteristischen Korndurchmesser. Er begründet dies damit, dass ein Korn nicht mit seiner vollen Größe zur Rauheit beiträgt, da es in die umgebende Sohle eingebettet ist. Entscheidend für die Strömung ist die Oberfläche der Sohle, die wie gesagt durch die Standardabweichung erfasst werden kann. Weiterhin verwendet er den Sinus des Neigungswinkels α anstelle der Sohlenneigung I_s , da nur für geringe Winkel $\sin \alpha = I_s$ angenommen werden kann. Die von ABERLE (2000) angegebene Gleichung lautet:

$$\frac{q_c}{\sqrt{g \cdot s^3}} = 0,20 \cdot \sin \alpha^{-1,30} = 0,156 \cdot \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho}} \cdot \sin \alpha^{-1,30}. \quad (2.15a)$$

Unter Verwendung des mittleren Durchmessers der vorhandenen Deckschicht d_{mZ} nach Gl. (2.6) lautet Gl. (2.15a):

$$\frac{q_c}{\sqrt{g \cdot d_{mZ}^3}} = 0,079 \cdot \sin \alpha^{-1,11} = 0,062 \cdot \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho}} \cdot \sin \alpha^{-1,11}. \quad (2.15b)$$

In Naturmessungen stellte PALT (2001) eine deutliche Differenz zwischen dem Bewegungsbeginn des feinen und des groben Sohlenmaterials fest, wobei er die Grenze zwischen fein und grob bei 8 mm zog. Die von ihm aufgestellten Gleichungen lauten getrennt für den Bewegungsbeginn des feinen und des groben Materials:

$$d_i \leq 8 \text{ mm} \quad \frac{q_c}{\sqrt{g \cdot d_{65}^3}} = 0,039 \cdot \sqrt{\frac{\rho_S - \rho}{\rho}} \cdot I_S^{-1,16} \quad (2.16a)$$

$$d_i \geq 8 \text{ mm} \quad \frac{q_c}{\sqrt{g \cdot d_{65}^3}} = 0,093 \cdot \sqrt{\frac{\rho_S - \rho}{\rho}} \cdot I_S^{-1,25} \quad (2.16b)$$

Mit steiler werdender Sohlenneigung nimmt die Stabilität einer Sohle nicht nur durch größere Rauheitselemente zu, sondern auch durch abnehmende Verhältnisse von Wassertiefe zu Rauheitshöhe, deren Einfluss im folgenden diskutiert wird.

2.1.7 Einfluss der relativen Überdeckung

Die Wirkung der Rauheit ändert sich mit abnehmendem Verhältnis von Wassertiefe zu Rauheitshöhe von einem Oberflächenwiderstand zu einem Formwiderstand. Dies merkte bereits

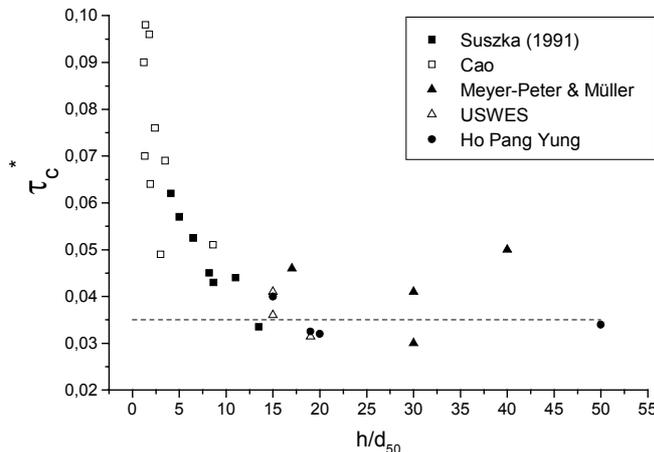


Abb. 2.12 Einfluss der relativen Überdeckung h/d_{50} auf den Shields-Parameter τ_c^* (Daten entnommen aus SUSZKA, 1991)

SHIELDS (1936) an und empfahl als Gültigkeitsgrenze seines Diagramms (Abb. 2.3) $R/d_K \approx 40$, um auf der sicheren Seite zu liegen. Die Darstellung der von SUSZKA (1991) zusammengetragenen Daten aus Versuchen mit Einkornmaterial in Abb. 2.12 zeigt allerdings, dass τ_c^* erst ab $h/d_{50} < 15$ deutlich steigt. SUSZKA (1991) hatte den Bewegungsbeginn erster Körner als kritischen Zustand angenommen, so dass der Grenzwert von $\tau_c^* \approx 0,035$, dem sich der Shields-Parameter für $h/d_{50} > 15$ nähert, etwa dem von SHIELDS (1936) angegebenen Wert von 0,03 entspricht.

Die in Abb. 2.12 dargestellte Kurve weist den folgenden funktionalen Zusammenhang auf (SUSZKA, 1991):

$$\tau_c^* = 0,0851 \cdot \left(\frac{h_c}{d_{50}} \right)^{-0,266} \quad (2.17)$$

Anhand von Laborversuchen zum Bewegungsbeginn von Einkornmaterial stellten SHVIDCHENKO & PENDER (2000) unter Verwendung weiterer Daten aus der Literatur das in Abb. 2.13 dargestellte Diagramm auf. Als Kriterium für den Bewegungsbeginn wählten sie die Transportintensität $I_T = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, d.h. der kritische Wert war erreicht, wenn pro Sekunde auf einer beobachteten Fläche einer von 10.000 Partikeln in Bewegung war. R_b bezeichnet dabei den auf die Sohle bezogenen hydraulischen Radius. Demnach ist für eine gegebene Korngröße τ_c^* um so größer, je geringer die relative Überdeckung bei größeren Neigungen ist. Weiterhin merkten sie an, dass τ_c^* nach Erreichen eines Maximums bei $Re^* \approx 200 - 300$

mit steigender Korn-Reynolds-Zahl wieder abnimmt, wofür jedoch keine Erklärung gegeben werden konnte.

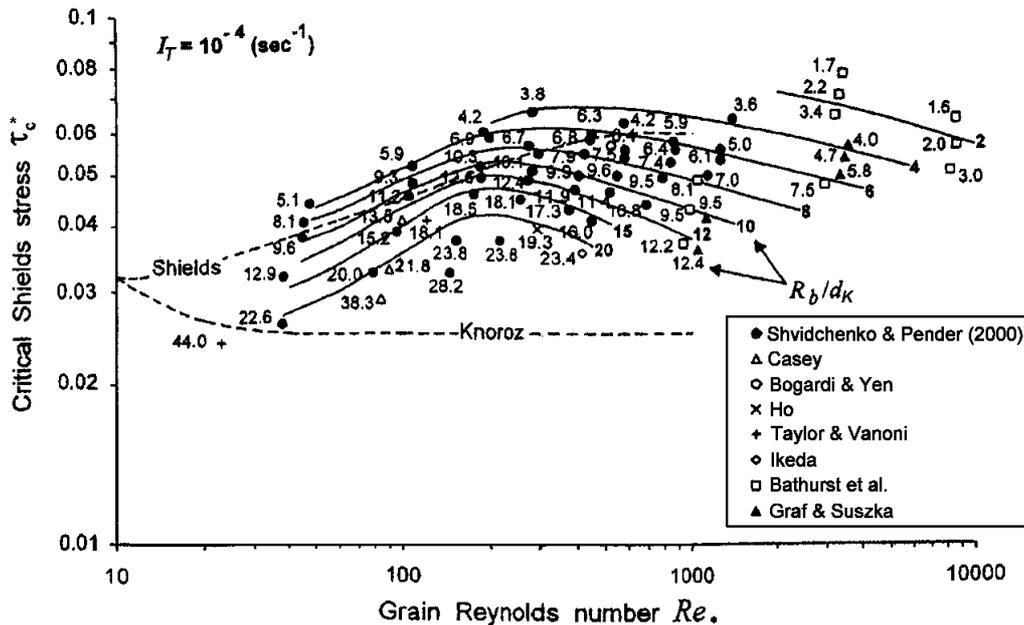


Abb. 2.13 Kritischer Shields-Parameter τ_c^* als Funktion der relativen Überdeckung R_b/d_K und der Korn-Reynolds-Zahl Re_* (aus SHVIDCHENKO & PENDER, 2000)

Der Einfluss der relativen Überdeckung, d.h. des Verhältnisses zwischen Wassertiefe h und absoluter Rauheitshöhe k , auf den Bewegungsbeginn wird im allgemeinen auf das durch geringe Wassertiefen deformierte Geschwindigkeitsprofil zurückgeführt. Dabei wird häufig BAYAZIT (1982) folgend angenommen, dass die tatsächliche Geschwindigkeit bei kleinen Verhältnissen h/k geringer ist als die nach dem logarithmischen Geschwindigkeitsgesetz berechnete. Der Strömungsangriff wäre also niedriger als angenommen und folglich müsste der Shields-Parameter größer als 0,03 - 0,06 sein (je nachdem was unter Bewegungsbeginn verstanden wird). Hingegen berichten z.B. O'LOUGHLIN & MACDONALD (1964) von gemessenen Geschwindigkeiten, die bei geringen h/k größer sind als nach dem logarithmischen Gesetz berechnet, d.h. eine Reduktion von τ_c^* wäre zu erwarten. Zur Klärung des Einflusses der relativen Überdeckung auf den Bewegungsbeginn ist also zunächst eine Erweiterung des Kenntnisstands zum Strömungsfeld über rauen Sohlen bei geringen Wassertiefen erforderlich. Einen Beitrag hierzu liefern die in Kap. 3 ausgeführten Untersuchungen.

2.1.8 Einfluss von Geschiebe

In den genannten die Stabilität einer Gewässersohle beeinflussenden Faktoren wurde jeweils davon ausgegangen, dass das transportierende Medium, sprich das Wasser, keine Feststoffe in Schwebelage oder als Geschiebe in den betrachteten Bereich einträgt. Jedoch weist eine Gewässersohle im Längsprofil unterschiedlich stabile Abschnitte auf, wobei mit Blick in Strömungsrichtung durchaus ein stabilerer Abschnitt auf einen weniger stabilen folgen kann. Dies kann z.B. durch einen Gefälleknick, durch eine andere Querschnittsgeometrie oder durch ein verändertes Sohlenmaterial aufgrund geologischer Eigenschaften oder eines Zuflusses bedingt sein. Material, das aus der Sohle selbst mobilisiert wird, entstammt einer in-

ternen Geschiebequelle. Abhängig von der Geologie und Morphologie des Einzugsgebietes kann aber auch Material von außerhalb, z.B. durch Oberflächenerosion, Uferabbrüche und in Gebirgsregionen durch Hangrutschungen und Murgänge, in das Gewässer eingetragen werden. Es stammt dann aus einer externen Geschiebequelle.

Der Begriff „Geschiebe“ bezeichnet im allgemeinen an der Sohle transportiertes Material, das in dem betrachteten Abschnitt selbst durch Überschreiten eines kritischen Strömungszustandes (einer kritischen Sohlenschubspannung, eines kritischen Durchflusses) aus der Sohle heraus mobilisiert wird. Für sehr feines Material, das von oberstrom in den betrachteten Abschnitt eingetragen wird und ohne Kontakt mit der Sohle durch diesen hindurchtransportiert wird, existiert der Begriff Spülfracht. Für grobes von oberstrom eingetragenes Material ist kein gesonderter Ausdruck bekannt. Da es jedoch als Geschiebe transportiert wird, soll es hier auch so genannt werden.

Während es einige Untersuchungen zum Einfluss von eingetragem Schwebstoff und Geschiebe auf das Verhalten locker gelagerter Sohlen und mobiler Deckschichten (z.B. NESTMANN, 1992; WILLETTS ET AL., 1997; TAIT ET AL., 1997; PENDER ET AL., 1997; PENDER & SHVIDCHENKO, 1999 sowie SIBANDA ET AL., 2000; DIETRICH ET AL., 1989; KUHNLE, 1993; BUFFINGTON & MONTGOMERY, 1999; WANG, 1999; LISLE ET AL., 2000; WILCOCK ET AL., 2001) sowie auf den Fließwiderstand (BATHURST, 1985; GRIFFITHS, 1981, 1989; SMART, 1999; SONG ET AL., 1998; WU & WANG, 1999) gibt, konnten nur drei Untersuchungen zur Auswirkung von Geschiebeeintrag auf eine statische Deckschicht in der Literatur gefunden werden. Dabei wurde jeweils der Eintrag von deutlich feinerem Material als dem vorhandenen Sohlenmaterial untersucht.

JACKSON & BESCHTA (1984) erzeugten zunächst durch Selbststabilisierung einer Sand-Kies-Mischung ($d_{\min} = 0,15 \text{ mm}$, $d_{50} \approx 10 \text{ mm}$, $d_{\max} = 20 \text{ mm}$) bei einer Neigung von $I_S = 2,7 \%$ ein Riffel-Pool-System. Anschließend gaben sie Sand mit einem mittleren Durchmesser von $0,3 \text{ mm}$ vermutlich einmalig bzw. über weniger als 5 min zu. Sie beobachteten, dass durch die

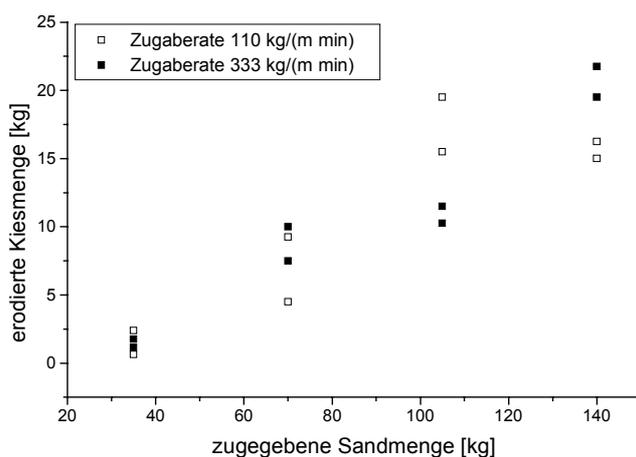


Abb. 2.14 Aus einer Deckschicht erodierte Kiesmengen ($d_{50} = 9 \text{ mm}$) als Funktion der Zugabemenge von Sand ($d_{50} = 0,3 \text{ mm}$) (nach JACKSON & BESCHTA, 1984)

Zugabe von Sand zuvor stabiles Sohlenmaterial erodiert wurde. Dabei stieg die Menge an erodiertem Kies mit der Zugabemenge (Abb. 2.14). Die Zugaberaten (133 kg/m-min und 110 kg/m-min) hatten keinen Einfluss auf die erodierten Kiesmengen. Die Gründe für die Mobilisierung des an sich stabilen Sohlenmaterials vermuten die Autoren in der höheren Viskosität des Sand-Wasser-Gemisches, in Änderungen der turbulenten Struktur der Strömung sowie in der Reduzierung des mittleren Korndurchmessers des Sohlenmaterials durch Einlagerung des Zugabematerials.

Die Stabilität einer Deckschicht ohne ausgeprägte Sohlenstrukturen untersuchten HASSAN & CHURCH (2000). Bei einer Sohlenneigung von $I_S = 0,62$ bzw. $0,66$ % ließen sie das Sohlenmaterial ($d_{\max} = 32$ mm) innerhalb von 16 Stunden eine Deckschicht ausbilden und gaben anschließend Sand ($d_{50} = 0,92 - 1,4$ mm) mit verschiedenen, sehr geringen Zugaberaten von $0,0067 - 0,0375$ kg/m·min zu. Referenzzugaberaten wurden aus der mittleren Transportrate zwischen Stunde 8 und 16 während der Abpflasterungsphase bestimmt und sind anschließend vermindert und erhöht worden. Die Kornverteilung des späteren Zugabematerials wurde ebenfalls aus dem während Stunde 8 und 16 erodierten Material bestimmt. Der Durchfluss war während der Abpflasterung und der Zugabe konstant gehalten worden. Wie JACKSON & BESCHTA (1984) beobachteten auch HASSAN & CHURCH (2000), dass mit Zugabebeginn zuvor stabiles Sohlenmaterial mobilisiert wurde. Mit fortschreitender Zugabedauer, die jeweils 80 Stunden betrug, näherte sich die Sieblinie des erodierten Materials der Sieblinie des Zugabematerials und die Transportrate der Zugaberate, d.h. es wurde mit fortdauernder Zugabe immer weniger Sohlenmaterial erodiert. In den Versuchen, in denen die Zugaberate gleich der bzw. höher als die Referenztransportrate war, hatte sich selbst nach 80 Stunden noch kein Gleichgewichtszustand eingestellt. Die Transportrate war immer noch höher als die Zugaberate. Weiterhin stellten sie fest, dass mit steigender Zugaberate das erodierte Material gröber wurde, vermutlich da der Anteil an erodiertem Sohlenmaterial stieg. Auch HASSAN & CHURCH (2000) begründen die mit der Zugaberate steigenden Transportraten anhand der Verfeinerung und der damit verbundenen Reduktion der kritischen Schubspannung des Sohlenmaterials.

EGASHIRA & ASHIDA (1991) untersuchten neben der Entstehung und dem Fließwiderstand von Sohlenstrukturen ebenfalls den Transport von Feinsediment ($d_K = 0,63$ mm) über eine statische Deckschicht ($d_{mD} = 26,3$ mm; $d_{\max} = 38$ mm; $I_S = 3,3$ %). Über 21 min gaben sie den Feinsand kontinuierlich mit einer Rate von $9,73$ kg/m·min zu. Der Durchfluss während der Zugabe betrug die Hälfte des kritischen Durchflusses der Deckschicht. Sie beobachteten, dass das Zugabematerial zunächst Lücken im Interstitial und anschließend die Pools auffüllte. Die Transportrate erreichte nach kurzer Zeit die Zugaberate und nach Beendigung der Zugabe wurde der Feinsand wieder ausgetragen. Im Gegensatz zu den Ergebnissen von JACKSON & BESCHTA (1984) und HASSAN & CHURCH (2000) bewirkte der Transport keine Mobilisierung von Deckschichtmaterial. Zu beachten ist jedoch, dass die anfängliche Rinnenneigung 8 % betragen hatte. Durch einen zu hoch eingestellten Durchfluss zur Entwicklung der Deckschicht reduzierte sich die Neigung im stabilen Zustand auf $3,3$ %. Vermutlich war bereits während der Herstellung der Deckschicht alles transportierbare Material aus der Rinne ausgetragen worden, so dass während der Zugabe kein Sohlenmaterial mehr mobilisiert werden konnte, zumal der Durchfluss um die Hälfte reduziert worden war.

In den Untersuchungen zum Einfluss von Geschiebetransport über locker gelagerten Sohlen wurden Experimenten mit Klarwasserabfluss Versuche mit verschiedenen Zugaberaten gegenübergestellt. Der kritische Durchfluss des locker gelagerten Sohlenmaterials war in jedem Fall während der Zugabe überschritten, so dass also auch ohne Zugabe Geschiebe transportiert worden ist. WILLETTS ET AL. (1997) beobachteten z.B. in den ersten acht Stunden des Versuchs eine gegenüber Klarwasserabflussbedingungen verringerte Transportrate aufgrund der Zugabe (Abb. 2.15). In den folgenden Stunden stieg die Transportrate im Fall des Zugaberversuchs. Nach ca. 23 Stunden wurde die Zugaberate erstmalig überschritten. Im weiteren

Verlauf liegt der Mittelwert der stark schwankenden Transportrate etwa in der Höhe der Zugaberate. Für den Zugaberversuch war ein relativ stabiler Zustand durch ein mobiles Gleichgewicht erreicht, während die Transportraten im Klarwasserversuch vernachlässigbar geworden waren, d.h. ein statisches Gleichgewicht hatte sich eingestellt.

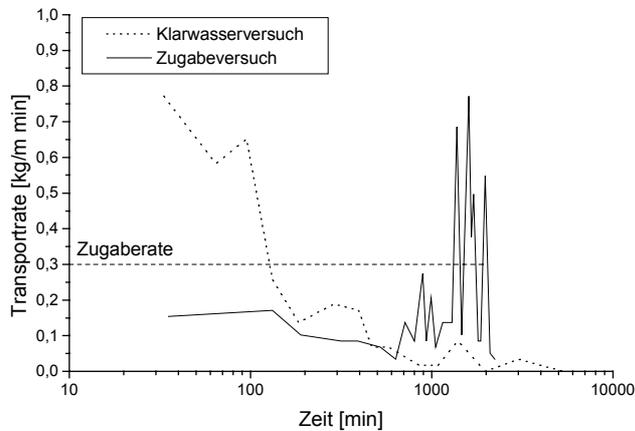


Abb. 2.15 Geschiebetransportrate bei Klarwasserabfluss und bei einer Zugaberate von 0,3 kg/m·min jeweils bei locker gelagerten Ausgangssohlen (nach WILLETTS ET AL., 1997)

WILLETTS ET AL. (1997) schlossen aus den Untersuchungen, dass die ursprünglich zum Transport des Sohlenmaterials zur Verfügung stehende Fließenergie durch das Zugabematerial zumindest über einen gewissen Zeitraum verringert wird. Der Eintrag von Geschiebe über einen kurzen Zeitraum hat demzufolge keine entscheidenden praktischen Auswirkungen, wohingegen lang anhaltender Eintrag von Geschiebe von oberstrom zu einer Destabilisierung der Sohle führt. Eine Unterscheidung des Sohlen- und Zugabematerials war in den Versuchen allerdings nicht möglich gewesen, da nahezu gleiche Kornmischungen verwendet wurden und die Materialien farblich nicht gekennzeichnet waren.

Die meisten Gewässer mit abpflasterungsfähigem Sohlenmaterial ($\sigma_g > 1,35$) weisen zumindest in Deutschland eine statische Deckschicht auf, da nicht zuletzt aufgrund der Verbauung der Gewässer die Voraussetzung eines unterbundenen Geschiebeeintrags gegeben ist. Unter dem Aspekt „Sohlenstabilität“ stellt sich also für eine vorhandene Deckschicht, die unter Klarwasserabflussbedingungen stabil ist, folgende Frage: Wird die Deckschicht durch den Eintrag von Geschiebe zumindest teilweise mobilisiert, da durch das eingetragene Material zusätzliche, destabilisierende Impulse auf die Sohle einwirken? Oder wird der Strömung durch den Transport des eingetragenen Geschiebes Fließenergie entzogen, wodurch die vorhandene Deckschicht bei höherem Durchfluss sogar geschützt werden könnte?

Dieser Fragestellung wurde mit den in Kap. 2.4 vorgestellten Versuchen nachgegangen. Zuvor wird jedoch in Kap. 2.2 ein Überblick über Geschiebetransportformeln für kiesführende Gewässer gegeben, da die Geschiebetransportrate erhöht oder verringert werden kann, je nachdem wie das eingetragene Geschiebe auf die vorhandene Deckschicht wirkt.

2.2 Geschiebetransport

Geschiebetransport, d.h. die gleitende, rollende und springende Bewegung von Sediment in Sohlennähe, setzt ein, wenn der Strömungsangriff die Stabilität der Sohle überschreitet, die durch die im vorangehenden Abschnitt diskutierten Faktoren beeinflusst wird. Zur Aufstellung von Geschiebetransportformeln wurde ebenso wie bei den Untersuchungen zur Sohlenstabilität zunächst von Einkornmaterial ausgegangen. Eine weitere, wesentliche Vereinfachung zur Entwicklung der Formeln war durch die Voraussetzung erreicht worden, dass der Transport unter quasi-stationären Bedingungen erfolgt. Inzwischen wird die Berechnung des Geschiebetransports mit numerischen Modellen durchgeführt, so dass Änderungen der Sohlenneigung durch Erosion oder Ablagerungen sowie Änderungen der Kornzusammensetzung des Geschiebes berücksichtigt werden können und die fraktionsweise Berechnung Standard ist. Die Verwendung der aus Versuchen mit Transport unter Gleichgewichtsbedingungen abgeleiteten Formeln beinhaltet jedoch zwangsläufig das Vorhandensein eines mobilen Gleichgewichts.

Der Begriff des mobilen Gleichgewichts und in diesem Zusammenhang der mobilen Deckschicht und der Transportkapazität wird im folgenden erläutert. Anschließend werden gebräuchliche Ansätze zur Berechnung des Geschiebetransports in kiesführenden Gewässern vorgestellt.

2.2.1 Mobile Deckschichten

Nach dem von JAIN (1990) aufgestellten Modell (Abb. 2.1) folgt der Region statischer Deckschichten bei steigendem Strömungsangriff ein Bereich, in dem sich wiederum ein Gleichgewichtszustand in Verbindung mit der Vergrößerung der Sohlenoberfläche einstellt. Eine wesentliche Voraussetzung für das Geschiebegleichgewicht ist ein ausreichend großer Geschiebeeintrag in den betrachteten Abschnitt.

MEYER-PETER & MÜLLER (1949) und nachfolgend viele andere erzeugten ein Geschiebegleichgewicht durch sogenannte Rezirkulationsversuche. In diesen Versuchen wird bei konstant gehaltenem Durchfluss das am Ende der Versuchsrinne austransportierte Material sofort am Anfang der Rinne wieder zugegeben. Aufgrund vertikaler Sortierungsprozesse (PARKER & KLINGEMAN, 1982; MARION & FRACAROLLO, 1997) vergrößert sich mit der Zeit das Material der obersten Sohlenschicht und die Kornzusammensetzung des Geschiebes nähert sich der Ausgangsmischung (PARKER ET AL., 1982a und b) (Abb. 2.16). Mit Erreichen des Gleichgewichts sind Kornzusammensetzung und Menge des Geschiebes, die Kornzusammensetzung der mobilen Sohlenoberfläche sowie die Höhenlage und Rauheit der Sohle annähernd konstant, weshalb der Fließwiderstand, die mittlere Fließgeschwindigkeit und die Wassertiefe ebenfalls nahezu konstant sind und quasi-stationäre Bedingungen vorliegen. Die größere Sohlenoberfläche wird dann als *mobile Deckschicht* (engl.: pavement) bezeichnet. Zur Entwicklung einer Formel können jetzt die zu dem eingestellten Durchfluss und der verwendeten Kornmischung gehörenden Parameter bestimmt werden.

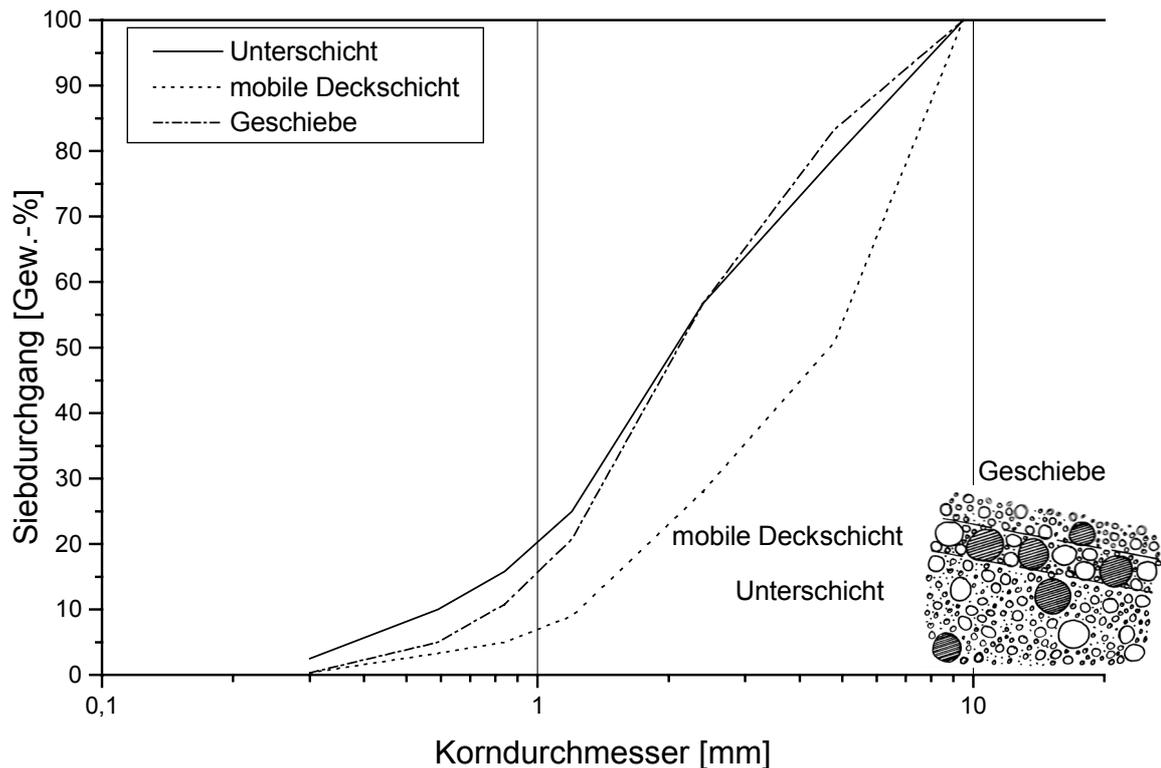


Abb. 2.16 Sohlenaufbau und Sieblinien bei mobilem Gleichgewicht (nach PARKER ET AL., 1982a)

PARKER & KLINGEMAN (1982) begründeten die Vergrößerung der obersten Sohlenschicht mit der Hypothese der *gleichen Mobilität* (engl.: equal mobility). Demnach erfolgt die Anreicherung größerer Körner an der Sohlenoberfläche, um die aufgrund des höheren Gewichts gegenüber feineren Körnern geringere Mobilität auszugleichen. Mit der Anzahl der groben Partikel an der Sohlenoberfläche steigt die Wahrscheinlichkeit transportiert zu werden und die Mobilität passt sich derjenigen der feinen Fraktionen an. Naheliegender ist jedoch die Erklärung der Vergrößerung aufgrund von partiellem Transport (WILCOCK, 1997; 2001). Im Gegensatz zu selektivem Transport sind alle Kornfraktionen in Bewegung, jedoch mit gegenüber der Unterschichtmischung veränderten Gewichtsanteilen. Die gröberen Fraktionen sind schwerer zu transportieren und ordnen sich deshalb, ähnlich wie bei der Entwicklung einer statischen Deckschicht, an der Sohlenoberfläche an.

Liegt eine mobile Deckschicht vor, wird auch davon gesprochen, dass die *Transportkapazität* einer Strömung erreicht ist. Unter der Transportkapazität ist diejenige Geschiebemenge zu verstehen, die ein Gewässer bei einem vorgegebenen Durchfluss transportieren könnte, ohne dass Material abgelagert oder erodiert wird. In dem Moment, in dem Geschiebetransport einsetzt, ändert sich jedoch die in den meisten Fällen bei niedrigen Durchflüssen bestimmte Rauheit und Hydraulik eines Gewässers, weshalb die zur Berechnung der Transportkapazität verwendeten Parameter angepasst werden müssten.

Wie leicht ein mobiles Gleichgewicht gestört werden kann, wurde noch nicht explizit untersucht. Jedoch erwähnen BUFFINGTON & MONTGOMERY (1999) die Sensitivität des Gleichgewichts hinsichtlich Änderungen der Kornverteilung des eingetragenen Geschiebes. DIETRICH ET AL. (1989) beobachteten eine Vergrößerung der Sohlenoberfläche als Folge reduzierter Zugaberaten. Eine mobile Deckschicht ist, zumindest in kiesführenden Gewässern, ebenso

wie der Zustand der maximalen Sohlenstabilität ein theoretischer Zustand, der unter Laborbedingungen hergestellt werden kann. Da jedoch über lange Zeit konstante Durchflüsse und unveränderte Kornverteilungen des eingetragenen Geschiebes erforderlich sind, kommt Geschiebetransport unter Gleichgewichtsbedingungen in der Natur mit kleiner werdendem Einzugsgebiet, steiler werdendem Gefälle und gröber werdendem Sohlenmaterial immer seltener vor. In Gebirgsbächen erhobene Naturdaten weisen deshalb besonders bei nur geringfügig bis mäßig überschrittenem kritischen Durchfluss eine große Streubreite auf. Erst bei deutlich höherem Strömungsangriff ist eine gewisse Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung gegeben (z.B. BATHURST ET AL., 1987; HEGG & RICKENMANN, 1999; RICKENMANN, 2001). Dieser Sachverhalt kommt in Abb. 2.17 zum Ausdruck. Die Transportraten der „kleinen“ Flüsse werden bei Verwendung der Formel von SCHOCKLITSCH (1962) bei weitem unterschätzt. Geringere Abweichungen zwischen Messung und Berechnung sind für die „größeren“ Flüsse zu verzeichnen. Ist das Sohlenmaterial weiterhin verhältnismäßig fein, wie im Beispiel des Tanana in Alaska, werden die Transportraten überschätzt.

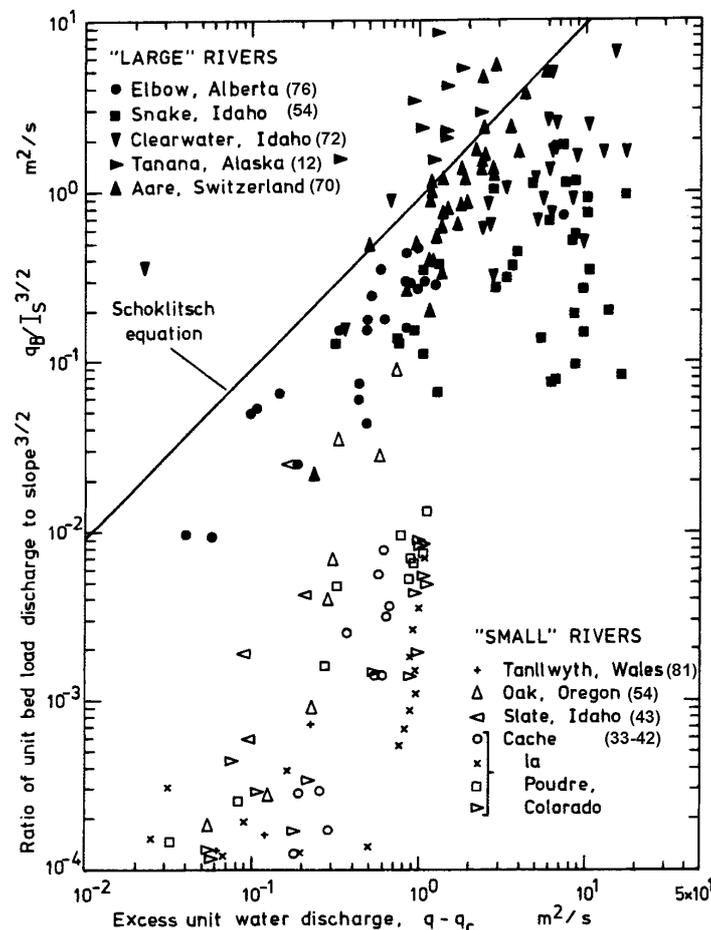


Abb. 2.17 Änderung des Geschiebetransports pro Breitereinheit und Sohlenneigung $q_B/I_S^{3/2}$ mit dem spezifischen Differenzdurchfluss ($q - q_c$) (aus BATHURST ET AL., 1987; modifiziert) (in Klammern ist der d_{50S} der Sohlenoberfläche angegeben)

Trotz der stark vereinfachenden Annahme des Transports unter Gleichgewichtsbedingungen werden die darauf basierenden Formeln zur Abschätzung der transportierten Mengen auch für kiesführende Mittelgebirgsflüsse und Gebirgsbäche verwendet. Zur Abschätzung der Größenordnung der Geschiebemengen werden häufig Transportformeln herangezogen, die

charakteristische Korndurchmesser des Sohlenmaterials verwenden. In numerischen Modellen erfolgt die Berechnung der Transportraten fraktionsweise.

2.2.2 Mittlerer Geschiebetransport

Die bekannteste Geschiebetransportformel für kiesiges Material entwickelten MEYER-PETER & MÜLLER (1949). Sie lautet:

$$q_B = 8 \cdot \left(\tau_m^* \cdot \left(\frac{k_{St}}{k_r} \right)^{1,5} - \tau_c^* \right)^{1,5} \cdot \sqrt{\frac{\rho_S - \rho}{\rho} \cdot g \cdot d_m^3}, \quad (2.18)$$

wobei q_B die Geschiebetransportrate [$m^3/(m \cdot s)$] ist, τ_m^* wird nach Gl. (2.2) mit $d_K = d_m$ (Gl. 2.6) berechnet, $(k_{St}/k_r)^{1,5}$ wird mit den Gln. (2.10a) und (2.10b) berechnet und τ_c^* wird zu 0,047 angenommen.

Einkornmaterialien mit verschiedener Dichte (1250 bis 4200 kg/m^3) und Mischungen mit $\rho_S = 2650$ kg/m^3 wurden in Rezirkulationsversuchen (Kap. 2.2.1) für Korngrößen von 0,04 bis 30 mm und Sohlenneigungen zwischen 0,04 und 2 % untersucht. Die verwendeten Sieblinien sind in Abb. 2.18 dargestellt.

Aufbauend auf den Untersuchungen von MEYER-PETER & MÜLLER (1949) erweiterten SMART & JÄGGI (1983) Gl. (2.18) für Sohlenneigungen bis 20 % zu:

$$q_B = 4 \cdot \frac{\tau_m^* - \tau_c^*}{\tau_m^*} \cdot \left(\frac{\rho_S - \rho}{\rho} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0,2} \cdot q_r \cdot I_S^{1,6}. \quad (2.19)$$

q_r ist der auf die Sohle bezogene spezifische Durchfluss, I_S die Sohlenneigung und d_{90} und d_{30} sind die Korndurchmesser bei 90 resp. 30 % Siebdurchgang. Die zusätzlich verwendeten Kornverteilungen sind ebenfalls in Abb. 2.18 dargestellt. Der Gültigkeitsbereich von Gl. (2.19) wird von SMART & JÄGGI (1983) wie folgt angegeben:

$$d_{90}/d_{30} < 8,5 \quad 0,04 \% < I_S < 20 \% \quad d_m > 0,4 \text{ mm.}$$

Da Transportereignisse in Gebirgsbächen häufig mit hohen Schwebstoffkonzentrationen verbunden sind, erweiterte RICKENMANN (1990) die Untersuchungen zur Berücksichtigung murgangähnlichen Transports durch Verwendung von Tonsuspensionen statt Klarwasser. Die steigende Dichte und Viskosität des transportierenden Mediums erhöhte zunächst die Geschiebemengen. Ab einer Konzentration von ca. 17 % sank die Geschiebetransportrate jedoch deutlich ab, da die Strömung im Bereich des transportierten Materials laminar wurde. Die Versuche wurden bei Sohlenneigungen zwischen 7 und 20 % durchgeführt. Unter Verwendung der Daten von MEYER-PETER & MÜLLER (1949) und SMART & JÄGGI (1983) entwickelte RICKENMANN (1990) für den Neigungsbereich $I_S = 5 - 20$ % die folgende, auch für Klarwasserabfluss gültige Gleichung:

$$q_B = 12,6 \cdot \left(\frac{\rho_S - \rho}{\rho} \right)^{-1,6} \cdot \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0,2} \cdot (q_r - q_c) \cdot I_S^2. \quad (2.20a)$$

Die Differenz zwischen Strömungsangriff und Sohlenwiderstand berechnet RICKENMANN (1990) nicht über die dimensionslosen Sohlenschubspannungen, sondern über die Differenz zwischen herrschendem und kritischem Durchfluss. Der Vorteil liegt darin, dass die in Gebirgsbächen sehr schwierige Bestimmung der mittleren Wassertiefe nicht erforderlich ist. Für den zum Bewegungsbeginn führenden Durchfluss pro Breitereinheit stellte RICKENMANN (1990) folgende Gleichung auf:

$$q_c = 0,065 \cdot \left(\frac{\rho_S - \rho}{\rho} \right)^{1,67} \cdot \sqrt{g \cdot d_{50}^3} \cdot I_S^{-1,12} \quad (2.20b)$$

Die charakteristischen Korndurchmesser beziehen sich jeweils auf die Kornverteilung des Geschiebes. Da diese in praktischen Anwendungsfällen meistens nicht bekannt sind bzw. in den Versuchen aufgrund der quasi-stationären Randbedingungen gleich denen der Ausgangsmischung waren, werden die Geschiebetransportraten im allgemeinen auf die Unterschichtmischung bezogen.

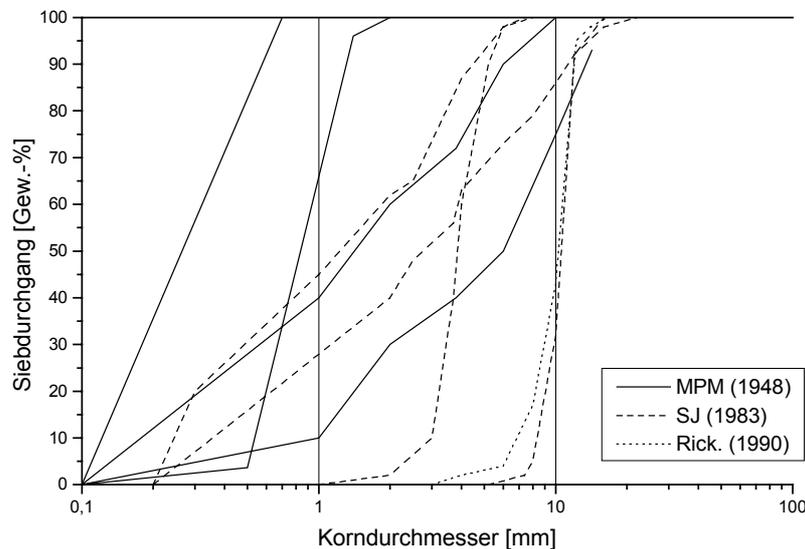


Abb. 2.18 Sieblinien der von MEYER-PETER & MÜLLER (1948), SMART & JÄGGI (1983) und RICKENMANN (1990) untersuchten Kornmischungen

Unter Verwendung der Datengrundlage der bisher genannten Ansätze sowie von Daten aus Naturmessungen im Himalaya-Karakorum leitete PALT (2001) folgende Gleichung zur Berechnung der Geschiebetransportraten ab:

$$q_B = 10041 \cdot \left(\tau_m^* \cdot \left(\frac{k_{St}}{k_r} \right)^2 \right)^{5,25} \cdot \sqrt{\frac{\rho_S - \rho}{\rho} \cdot g \cdot d_m^3} \quad \text{für } \tau_m^* \cdot \left(\frac{k_{St}}{k_r} \right)^2 < 0,22 \quad (2.21a)$$

$$q_B = 29,57 \cdot \left(\tau_m^* \cdot \left(\frac{k_{St}}{k_r} \right)^2 \right)^{1,42} \cdot \sqrt{\frac{\rho_S - \rho}{\rho} \cdot g \cdot d_m^3} \quad \text{für } \tau_m^* \cdot \left(\frac{k_{St}}{k_r} \right)^2 > 0,22 \quad (2.21b)$$

τ_m^* wird nach Gl. (2.2) mit $d_K = d_m$ (Gl. 2.6) und $(k_{St}/k_r)^2$ mit den Gln. (2.10a) und (2.10b) berechnet.

2.2.3 Fraktionsweiser Geschiebetransport

In den oben vorgestellten Ansätzen wird aus einem oder mehreren das Sohlenmaterial charakterisierenden Korndurchmessern die mittlere Gesamttransportrate q_B [$m^3/(m \cdot s)$] berechnet. Mit dem Ansatz des fraktionsweisen Geschiebetransports wird hingegen zunächst die Transportrate q_{Bi} jeder Fraktion einzeln berechnet. Diese werden anschließend aufsummiert, so dass für den Gesamttransport gilt:

$$q_B = \sum_{i=1}^n q_{Bi} \quad (2.22)$$

Die Formeln der Einzeltransportraten enthalten im allgemeinen eine Wichtung durch den prozentualen Gewichtsanteil der jeweiligen Fraktion Δp_i , eine Ausgleichsfunktion, mit der das unterschiedliche Verhalten von Einkorn- und Mischkornsohlen erfasst wird (siehe Kap. 2.1.4), sowie einen Term, der den Strömungsangriff und die Sohlenstabilität erfasst. Ziel der fraktionsweisen Berechnung ist die Berücksichtigung der sich mit dem Strömungsangriff verändernden Kornzusammensetzung des Geschiebes. Weiterhin soll der im Fall von nur geringfügig überschrittenem Bewegungsbeginn auftretende selektive oder partielle Transport erfasst werden.

Zu diesem Zweck erweiterte HUNZIKER (1995) den Ansatz von MEYER-PETER & MÜLLER (1949) (Gl. 2.18). Die Ausgleichsfunktion, die bereits in Gl. (2.8) vorgestellt wurde, bezieht er nicht nur auf den kritischen Shields-Parameter, sondern auch auf den durch τ_m^* ausgedrückten Strömungsangriff. Weiterhin berücksichtigt er die durch die Sieblinie des Unterschichtmaterials gegebene Lagerungsbedingung mit dem Faktor $(d_m/d_{mS})^{0,33}$ sowie Schubspannungsschwankungen in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl Re analog zu GÜNTER (1971) mit dem Parameter η . Die von HUNZIKER (1995) modifizierte Formel von MEYER-PETER & MÜLLER (1949) lautet damit:

$$q_{Bi} = 5 \cdot \Delta p_i \cdot \left[\left(\frac{d_i}{d_{mS}} \right)^{-\beta_H} \cdot \left(\tau_m^* \cdot \left(\frac{k_{St}}{k_r} \right)^{1,5} - \tau_{c^* m} \right) \right]^{1,5} \cdot \sqrt{\frac{\rho_S - \rho}{\rho} \cdot g \cdot d_{mS}^3} \quad (2.23)$$

mit:

$$\beta_H = 0,011 \cdot \left(\tau_m^* \cdot \left(\frac{k_{St}}{k_r} \right)^{1,5} \right)^{-1,5} - 0,3 \quad (\text{vgl. Gl. 2.8})$$

$$\tau_m^* = \frac{\rho \cdot g \cdot R_b \cdot l_E}{(\rho_S - \rho) \cdot g \cdot d_{mS}} \quad (\text{vgl. Gl. 2.2})$$

$$\tau_{c^* m} = \frac{1}{\eta} \cdot \tau_c^* \cdot \left(\frac{d_m}{d_{mS}} \right)^{0,33} \quad \text{und } \tau_c^* = 0,05$$

$$\eta = 1,03 + 3,44 \cdot 10^{-6} \cdot Re \quad \text{für } Re < 150.000$$

$$\eta = 1,03 + 3,44 \cdot 10^{-6} \cdot 150.000 \quad \text{für } Re \geq 150.000$$

R_b ist der auf die Sohle bezogene hydraulische Radius, d_m der mittlere Korndurchmesser der Unterschicht und d_{mS} der mittlere Korndurchmesser der obersten Sohlenschicht, d.h. der mobilen Deckschicht.

Der Vorteil der fraktionsweisen Berechnung der Geschiebetransportraten kann mit diesem Ansatz allerdings aufgrund der Differenz zwischen Strömungsangriff und Sohlenwiderstand nicht voll genutzt werden. Die Überschussschubspannung wird als Funktion des mittleren Korndurchmessers berechnet. Sobald der zum Transport von d_m erforderliche Strömungsangriff geringer als der auf d_m bezogene kritische Shields-Parameter ist, wird die Differenz negativ und Gl. (2.23) ist nicht mehr definiert. Damit können auch die Transportraten der Fraktionen mit $d_i < d_m$ nicht mehr berechnet werden.

Ausgehend von Naturdaten (PARKER ET AL., 1982b) entwickelten PARKER & KLINGEMAN (1982) ein Modell, das sie anhand von Labordaten aus Rezirkulations- und Zugaberversuchen (PARKER ET AL., 1982a) verifizierten. Zunächst bezog sich die Berechnung der kritischen Parameter, die den Bewegungsbeginn charakterisieren, und damit die Berechnung der Transportraten auf das Unterschichtmaterial. PARKER (1990) formulierte den Ansatz um, so dass ausschließlich Parameter des Materials an der Sohlenoberfläche maßgebend sind. Das Modell (Gl. 2.24) enthält die folgenden Annahmen (BAKKE ET AL., 1999):

- das Geschiebe wird aus der Sohle mobilisiert
- der Geschiebetransport erfolgt unter Gleichgewichtsbedingungen, d.h. im besonderen ist die Sieblinie des Geschiebes gleich derjenigen des Unterschichtmaterials (equal mobility, siehe Kap. 2.2.1)
- durch vertikale Sortierungsprozesse entwickelt sich eine mobile Deckschicht, die größer als das Unterschichtmaterial ist.

Die Transportrate einer Fraktion q_{Bi} (Gl. 2.24a) ist abhängig von der dimensionslosen Funktion $G(\phi_i)$ (Gl. 2.24b), die wiederum eine Funktion des Strömungsangriffs (Gl. 2.24c) und der Sieblinie des Materials an der Sohlenoberfläche (Gln. 2.24d und e) ist. Gl. (2.24d) stellt die Ausgleichsfunktion dar und mit Gl. (2.24e) wird die Änderung der Häufigkeitsverteilung der mobilen Deckschicht berücksichtigt. Die zum Transport zur Verfügung stehende Strömungskraft wird zu τ_c^* ins Verhältnis gesetzt und nicht wie in den bereits vorgestellten Gleichungen als Differenz zum kritischen Wert ausgedrückt. Das oben erwähnte Problem nicht definierter Terme im Bereich des Bewegungsbeginns wird dadurch vermieden und es ist möglich, die Transportraten der Fraktionen mit $d_i < d_g$ (der hier verwendete maßgebende Korndurchmesser) zu berechnen. Die Grenze zwischen Ruhe und Bewegung definierten PARKER & KLINGEMAN (1982) mit Hilfe der dimensionslosen Referenztransportrate $W_R^* = 0,00218$, aus der $\tau_c^* = 0,0386$ rückgerechnet wurde.

Das auf die Sohlenoberfläche bezogene Modell lautet (PARKER, 1990):

$$q_{Bi} = W_R^* \cdot G(\phi_i) \cdot \Delta p_i \cdot \frac{u_*^3}{g \cdot (\rho_S - \rho) / \rho} \quad (2.24a)$$

mit: $W_R^* = 0,00218$

$$G(\phi_i) = \begin{cases} 5474 \cdot \left(1 - \frac{0,853}{\phi_i}\right)^{4,5} & \phi_i > 1,59 \\ e^{(14,2 \cdot (\phi_i - 1) - 9,28 \cdot (\phi_i - 1)^2)} & 1 \leq \phi_i \leq 1,59 \\ \phi_i^{14,2} & \phi_i < 1 \end{cases} \quad (2.24b)$$

mit: $\phi_i = \phi_{go} \cdot g_o \cdot \omega$

$$\phi_{go} = \frac{\tau_g^*}{\tau_c^*} = \frac{1}{0,0386} \cdot \frac{\tau_0}{(\rho_S - \rho) \cdot g \cdot d_g} \quad (2.24c)$$

mit: $d_g = e^{\sum \Delta p_i \cdot \ln d_i}$ und $d_i = \sqrt{d_{ia} \cdot d_{ib}}$

$$g_o = \left(\frac{d_i}{d_g}\right)^{-0,0951} \quad (2.24d)$$

$$\omega = 1 + \frac{\sigma_\phi}{\sigma_{\phi o}} \cdot (\omega_o - 1) \quad (2.24e)$$

mit: $\sigma_\phi = \sqrt{\sum \left(\frac{\ln(d_i / d_g)}{\ln 2}\right)^2 \cdot \Delta p_i}$; ω_o und $\sigma_{\phi o}$ aus Abb. 2.19

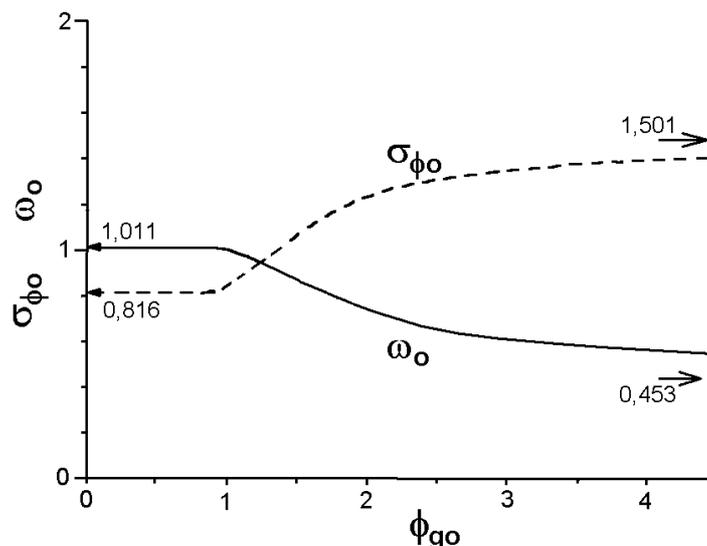


Abb. 2.19 Bestimmung der Parameter ω_o und $\sigma_{\phi o}$ (aus PARKER, 1990)

Die Transportraten werden ausschließlich aus der Kornverteilung der obersten Sohlenschicht berechnet, weshalb auf den Index „S“ verzichtet wurde. d_{ia} und d_{ib} sind die untere resp. obere Korngrenze der Fraktion i (vgl. Abb. 2.6). τ_0 wird nach Gl. (2.1) mit I_E statt I_S berechnet. Der Index „o“ bezeichnet empirische Parameter und Funktionen, die unter Verwendung der Naturdaten vom Oak Creek in Oregon ermittelt worden sind. Der Zusammenhang zwischen ϕ_{go} und ω_o bzw. σ_{ϕ_o} (Abb. 2.19) gilt an sich nur für den Oak Creek. Eine umfassende Auswertung des Geschiebes unterschiedlicher Gewässer hinsichtlich parametrisierbarer Änderungen der Kornzusammensetzung mit dem Strömungsangriff steht jedoch noch aus, weshalb Abb. 2.19 auch auf andere Flüsse übertragen wird.

Grundlage der vorgestellten Ansätze zur Berechnung des Geschiebetransports kiesführender Gewässer sind die Annahmen, dass das Geschiebe aus der Sohle des betrachteten Abschnitts stammt und dass in jedem Zeitschritt quasi-stationäre Fließbedingungen vorliegen. Änderungen der Randbedingungen durch Material aus externen Geschiebequellen können somit nicht berücksichtigt werden. Vielmehr muss das vorhandene Sohlenmaterial durch Überschreiten eines kritischen Strömungsangriffs mobilisiert werden. Mit der zweiten Annahme wird zum einen impliziert, dass eine eventuell vorhandene statische Deckschicht aufgebrochen werden konnte, da ansonsten die Sieblinie des Geschiebes nicht gleich der Sieblinie des Unterschichtmaterials sein kann. Zum anderen wird vorausgesetzt, dass sich die Transportverhältnisse augenblicklich veränderten Strömungsverhältnissen anpassen, so dass ständig Transport unter Gleichgewichtsbedingungen herrscht. Diese Annahmen können in großen Flüssen zutreffen, deren Sohlen aus feinkörnigen Sedimenten mit relativ engen Sieblinien bestehen und deren Hydrologie durch lang anhaltende Hochwasserganglinien geprägt sind. Die weniger guten Übereinstimmungen zwischen Berechnungen und Naturmessungen der Transportraten kiesführender Flüsse (siehe Abb. 2.17) deuten jedoch darauf hin, dass die Annahme eines Geschiebegleichgewichts zumindest dort nicht gerechtfertigt ist (BUFFINGTON & MONTGOMERY, 1999) und der Eintrag externen Geschiebes in der Untersuchung von Gebirgsbächen nicht zu vernachlässigen ist (HEGG & RICKENMANN, 1999; RICKENMANN, 2001).

Aus dem Literaturstudium resultieren weiterhin offene Fragen zu den Themen Sohlenstabilität und Geschiebetransport, die im folgenden Abschnitt zusammengefasst werden.

2.3 Ableitung offener Fragen

Der in den vorangehenden Abschnitten aufbereitete Stand des Wissens verdeutlicht die Vielfaltigkeit der Faktoren, die die Stabilität einer Gewässersohle beeinflussen, und die damit verbundenen Schwierigkeiten in der Berechnung des Geschiebetransports. Diese Faktoren können in Charakteristika des Strömungsfeldes und der Gewässersohle unterteilt werden.

Hinsichtlich der Charakteristika der Gewässersohle wird weiterer Forschungsbedarf in der Untersuchung der Häufigkeitsverteilung des Sohlenmaterials und besonders in der Untersuchung des Einflusses von Geschiebetransport auf eine statische Deckschicht gesehen. Obwohl kiesführende Gewässer sich im allgemeinen durch eine bei Niedrig- und Mittelwasserabfluss weitestgehend statische Sohle auszeichnen, ist dieser Aspekt bisher kaum beachtet worden. Dabei ist vor allem in der Untersuchung von Gebirgsbächen der Eintrag von Geschiebe aus externen Quellen nicht zu vernachlässigen. Wird Geschiebe in einen bei Klarwasserabfluss stabilen Gewässerabschnitt eingetragen, sind zwei Reaktionen denkbar: 1.) die Deckschicht wird durch das externe Material geschützt, da ein Teil der Fließenergie zum Transport benötigt wird, oder 2.) aus dem Transport des eingetragenen Geschiebes resultieren zusätzliche Kräfte, die die statische Deckschicht belasten und somit zu erhöhten Transportraten führen.

Diese Fragestellung geht Hand in Hand mit der Frage nach dem Einfluss einer statischen Deckschicht auf den Geschiebetransport. Eine wesentliche Randbedingung der zur Entwicklung der Formeln erhobenen Labordaten ist das Vorhandensein eines mobilen Gleichgewichts.

Inwieweit dieses Gleichgewicht in der Natur existiert, kann nur anhand von Felduntersuchungen geklärt werden. Im Labor kann jedoch untersucht werden, welche Voraussetzungen zum Erreichen eines Geschiebegleichgewichts erforderlich sind und ob seine Existenz notwendig ist, um eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Ergebnissen zu erzielen. Die Interaktion zwischen einer statischen Deckschicht und transportiertem Material wurde anhand der im folgenden vorgestellten und analysierten Experimente untersucht.

Hinsichtlich des Einflusses von Eigenschaften des Strömungsfeldes auf Sohlenstabilität und Geschiebetransport besteht generell Forschungsbedarf zum Strömungsfeld über rauen Sohlen und im besonderen zur Untersuchung der Liftkraft sowie der relativen Überdeckung. Die Ausführungen in Kap. 3 liefern einen Beitrag zur Erweiterung der Kenntnisse zum Geschwindigkeitsfeld über rauen Sohlen unter besonderer Berücksichtigung des Verhältnisses von Wassertiefe zu Rauheitshöhe.

2.4 Experimente

Mit den Versuchen wurde erstmalig systematisch die Auswirkung von externem Geschiebeeintrag auf eine vorhandene statische Deckschicht und wechselseitig der Einfluss der Deckschicht auf den Geschiebetransport untersucht. Hierzu wurde ein steiler Gefällebereich gewählt, da die Sohle bei hohen Neigungen nicht nur durch die Deckschicht, sondern zusätzlich durch ausgeprägte Sohlenstrukturen stabilisiert wird.

2.4.1 Versuchsaufbau

Die Experimente wurden an dem von ROSPORT (1998) eingerichteten Versuchstand durchgeführt. In die 23,6 m lange und 0,6 m breite Kippbinne des Theodor-Rehbock-Laboratoriums (siehe auch Abb. 3.27) war eine 0,2 m breite und 6,8 m lange Rinne aus Schalbrettern mit einer festen Neigung von 6 % installiert (Abb. 2.20). Zur Stützung des Einlaufbereichs war dort eine flache raue Rampe (1:10) aus Steinen eingebaut.

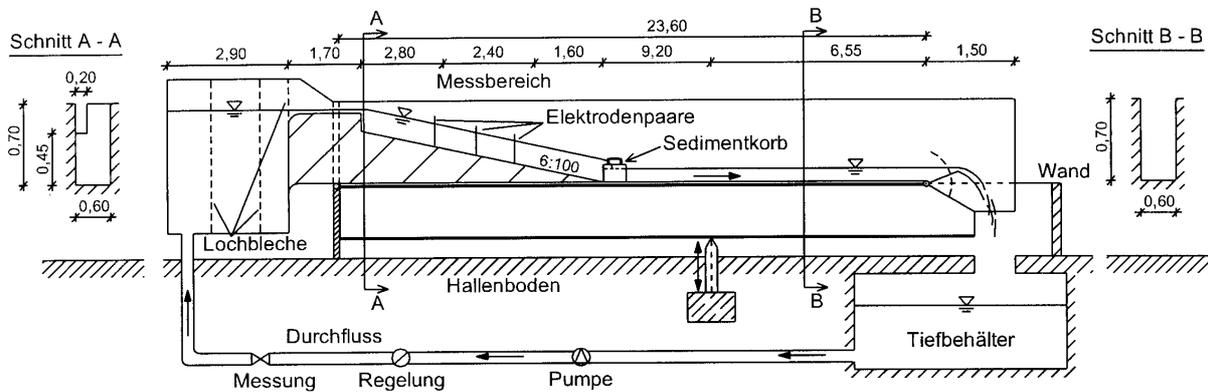


Abb. 2.20 Versuchstand der Stabilitätsversuche (unmaßstäblich)

Die Untersuchungen von ROSPORT (1998) zeigen, dass ein Step-Pool-System bei großer Sohlenneigung und grober Ausgangsmischung ausgeprägter ist, als bei geringerer Neigung und/oder feinerer Kornverteilung. Die Neigung der Kippbinne wurde auf 3,7 % eingestellt, so dass die Gesamneigung der Rinnensohle 9,7 % betrug. Die grobe Kornmischung von ROSPORT (1998) mit einem Größtkorn von 64 mm wurde gewählt (siehe Abb. 2.21). Das Ausgangsmaterial A_x wurde gut durchmischt mit einer Stärke von 15 cm in die Rinne eingebracht, leicht verdichtet und glatt gezogen, so dass eine ebene, zur Rinnensohle parallele Oberfläche vorlag.

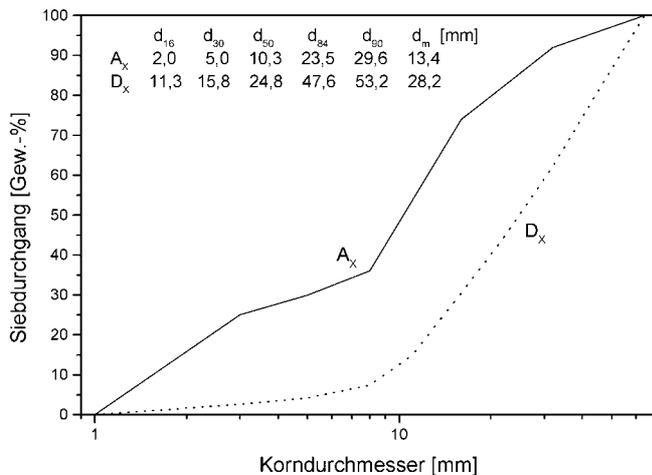


Abb. 2.21 Sieblinien und charakteristische Korndurchmesser des Ausgangsmaterials A_x und der Deckschicht im Zustand maximaler Sohlenstabilität D_x

2.4.2 Versuchsablauf

Die Ausgangssituation für die Zugabeversuche stellte nicht die lockere Sohle dar, sondern eine Deckschicht D_x im Zustand maximaler Sohlenstabilität, deren Kornverteilung ebenfalls in Abb. 2.21 dargestellt ist. Die maximale Sohlenstabilität wurde gewählt, um von definierten Stabilitätsbedingungen ausgehen zu können. Unter einer Deckschicht im Zustand maximaler Sohlenstabilität wird dabei diejenige Deckschicht verstanden, die sich gerade noch in dem vorgegeben Gefällebereich ausbilden kann (siehe Kap. 2.1.5). Wird der zu diesem Zustand gehörende kritische Durchfluss Q_c überschritten, dann reißt die Deckschicht auf und eine erneute Selbststabilisierung ist mit einer deutlichen Gefällereduktion verbunden. Die Untersuchungen von ROSPORT (1998) und ABERLE (2000) zeigten keine morphologischen und hydraulischen Unterschiede für den Neigungsbereich zwischen 8 und 10 %. Diese Aussage wurde hinsichtlich des Transportverhaltens in Vorversuchen, in denen die Rinnenneigung auf 7,0 und 9,7 % eingestellt worden war, überprüft und bestätigt (KOLL & DITTRICH, 1998). Eine Abnahme des Gefälles um bis zu 20 % des Ausgangswertes konnte deshalb toleriert werden. Der Ablauf eines Versuchs ist schematisch in Abb. 2.22 dargestellt.

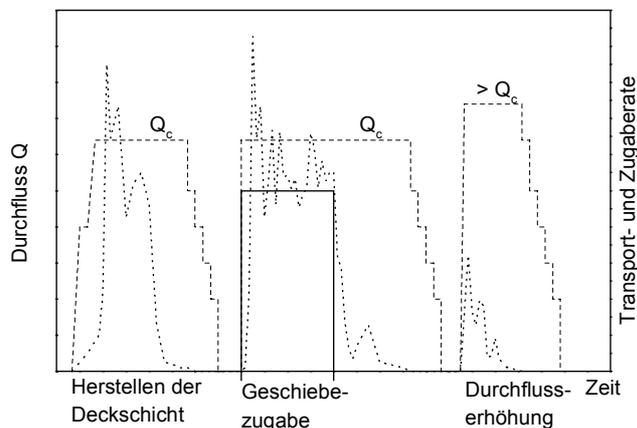


Abb. 2.22 Ablauf der Zugabeversuche (-----Durchfluss, ———Zugaberate,Transportrate)

Das Step-Pool-System wurde durch Selbststabilisierung der Sohle erreicht und nicht wie z.B. von WHITTAKER (1982) künstlich hergestellt. In der Mehrzahl der Versuche wurde hierzu der aus den Untersuchungen von ROSPORT (1998) bekannte kritische Durchfluss, der für die gewählte Kornmischung bei 9,7 % Rinnenneigung $Q_c = 3,2$ l/s beträgt, durch schrittweises Erhöhen eingestellt. Da eine zweidimensionale Sohlenrauheit gewünscht war, wurde darauf geachtet, dass der Durchfluss eines Zwischenschrittes

nicht zu lange konstant gehalten wurde, um die Ausbildung von Fließrinnen zu vermeiden.

Nach Erreichen eines stabilen Zustands wurde mit Hilfe der Salzverdünnungsmethode die über den Messbereich gemittelte Fließgeschwindigkeit bestimmt. Hierzu waren drei Elektrodenpaare (am Anfang, in der Mitte und am Ende der Messstrecke) in der Rinne angebracht. In ausreichendem Abstand oberstrom des ersten Elektrodenpaares wurde eine Salzlösung zugegeben. Die mittlere Fließgeschwindigkeit wurde aus dem zeitlichen Abstand der Maxima der drei aufgezeichneten Ganglinien der elektrischen Leitfähigkeit bestimmt. Dadurch wurden drei Geschwindigkeiten gemessen: zwischen der oberen und der mittleren Sonde, zwischen der mittleren und der unteren Sonde und zwischen der oberen und der unteren Sonde. Eine Messung bestand weiterhin aus drei Einzelmessungen. Die mittlere Fließgeschwindigkeit im Messbereich wurde durch Mittelwertbildung über die Messstrecke und die drei Einzelmessungen bestimmt. Da der Durchfluss gesondert über einen induktiven Durchflussmesser (IDM) gemessen wurde, konnte die über die Rinnenbreite B_R gemittelte Wassertiefe h mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung $h = Q/(B_R \cdot u_m)$ berechnet werden.

Der Durchfluss wurde anschließend in Schritten von 0,5 l/s reduziert und bei jedem Durchfluss wurde die Fließgeschwindigkeit gemessen. Bei abgestelltem Durchfluss wurden Fotos von der Sohlenoberfläche aufgenommen und mit Hilfe der Linienzahlanalyse nach FEHR (1987) die Kornverteilung der Deckschicht bestimmt. Mit einem Laserabstandsmessgerät (OPTImess 100 HP der Firma TDP, mittlere Messgenauigkeit = 0,06 mm) wurde die Sohle berührungsfrei abgetastet und daraus die Sohlenneigung sowie die Standardabweichung der Sohlenerhebungen berechnet. Die Sohlenabastung des 2,4 m langen Messbereichs erfolgte mit einem Messabstand von $\Delta x = 2,5$ mm in Hauptströmungsrichtung und quer dazu mit $\Delta y = 10$ mm, so dass 10 Längsprofile mit jeweils 960 Datenpunkten zur Verfügung standen.

Nachdem ein Versuch auf die beschriebene Weise vorbereitet worden war, konnte die Zugabe erfolgen, wobei als Durchfluss meistens wiederum der kritische Durchfluss eingestellt und bis zum Ende des Versuchs konstant gehalten wurde. Die Zugabe erfolgte also im allgemeinen bei Durchflüssen, die nicht zum Transport von Sohlenmaterial führten. Als Zugabematerial wurde der gleiche Kies wie für die Sohle verwendet, der jedoch zuvor mit Dispersionsfarbe eingefärbt worden war, um eine getrennte Analyse von transportiertem Zugabematerial und erodiertem Sohlenmaterial bei gleicher Kornform und gleichem spezifischen Gewicht zu ermöglichen. Die Oberflächenrauheit des Kiesel wurde durch die Dispersionsfarbe nicht verändert. Die Zugabe erfolgte im Abstand von 30 Sekunden direkt oberstrom der Kiessohle, so dass eine Mobilisierung von Sohlenmaterial durch den Zugabeimpuls vermieden werden konnte. Das austransportierte Material wurde unterstrom der aus Schalbrettern bestehenden Rinne in auswechselbaren Körben aufgefangen. Die Analyse des transportierten Materials in vorgegebenen Intervallen lieferte die zeitabhängigen Kornverteilungen und Transportraten des Sohlen- und des Zugabematerials. Während der Zugabe wurde die mittlere Fließgeschwindigkeit mit Hilfe der Salzverdünnungsmethode gemessen, wobei wiederum jede Messung dreimal durchgeführt wurde.

Ein Versuch war nicht mit dem Ende der Zugabe abgeschlossen, sondern dauerte an, bis die innerhalb einer Stunde transportierte Geschiebemenge weniger als 200 g betrug (Referenztransportrate $g_r = 0,017$ kg/m·min). Bei einer Wassertiefe von ca. 3 cm und einer Sohlenneigung von ca. 8,6 % entspricht diese Menge einer dimensionslosen Transportrate von 0,0004 und liegt somit deutlich unterhalb der von PARKER (1990) angegebenen Referenztransportrate $W_r^* = 0,00218$. Die Messung der Fließgeschwindigkeit und des transportierten Materials wurde bis zum Ende des Versuchs fortgesetzt. Nachdem der Durchfluss wiederum schrittweise heruntergefahren worden war, wurde erneut die Sohle abgetastet und zur Bestimmung der Deckschichtverteilung fotografiert.

Anschließend wurde ausgehend von Q_c der Durchfluss in Schritten von 0,5 l/s erhöht und jeweils so lange konstant gehalten bis die Geschiebemenge nach obiger Definition vernachlässigbar gering war. Hierbei wurde das gleiche Messprogramm wie für den Teil mit Zugabe durchgeführt. Der Gesamtversuch war beendet, wenn die Sohle sich unter dem auferlegten Strömungsangriff nicht mehr ohne deutliche Gefällereduktion selbst stabilisieren konnte.

2.4.3 Versuchsparameter

Mit dem Versuch V0 wurde zunächst die Reproduzierbarkeit der Versuche von ROSPORT (1998) im steilen Bereich mit der groben Kornmischung überprüft. Hierzu wurde ausgehend von der locker gelagerten Sohle jeweils eine Deckschicht bei einem um 0,5 l/s erhöhten Durchfluss hergestellt. Bei $Q = 3,7$ l/s brach die Deckschicht auf und konnte sich nicht mehr auf dem vorgegebenen Niveau stabilisieren, so dass der von ROSPORT (1998) bestimmte kritische Durchfluss $Q_c = 3,2$ l/s bestätigt wurde.

Die Mehrheit der Versuche wurde, wie bereits erwähnt und in Abb. 2.22 dargestellt, bei dem kritischen Durchfluss der Deckschicht Q_c durchgeführt, um die Reaktion einer Deckschicht auf Änderungen der Zugabeparameter zu untersuchen. Die variierten Zugabeparameter sind die Korngröße des Zugabematerials d_{zu} , die Zugaberate g_{zu} und die Zugabedauer T . Dokumentationen von Hochwasserereignissen in Gebirgsbächen zeigen, dass die Kornverteilung des transportierten Materials häufig in der Größenordnung des Unterschichtmaterials liegt (z.B. KUHNLE & WILLIS, 1992; LISLE, 1995; RICKENMANN, 2001). Zur Untersuchung des Einflusses von Zugaberate und Zugabedauer wurde deshalb die Fraktion 5 - 8 mm gewählt, die geringfügig kleiner als der d_{50} des Unterschichtmaterials ist (vgl. Abb. 2.21). Der Zusammenstellung von RICKENMANN (2001) zufolge liegen übliche Transportraten steiler Gewässer ($I_s = 1 - 10$ %) etwa zwischen 0,17 und 50 kg/m·min, so dass die zwischen 1,25 und 40 kg/m·min gewählten Zugaberaten in einem für Gebirgsbäche typischen Bereich liegen. Die Versuchsbedingungen sind in Tab. 2.2 zusammengestellt.

Tab. 2.2 Versuche mit der Zugabefraktion 5 - 8 mm

Versuch	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
Zugaberate g_{zu} [kg/m·min]	1,25	2,5	5	5	5	10	40
Zugabedauer T [min]	120	60	60	120	480	60	60
Zugabemenge Z [kg]	30	30	60	120	480	120	480

Weiterhin wurde die Reaktion der vorhandenen Deckschicht auf die Korngröße des eintransportierten Materials untersucht.

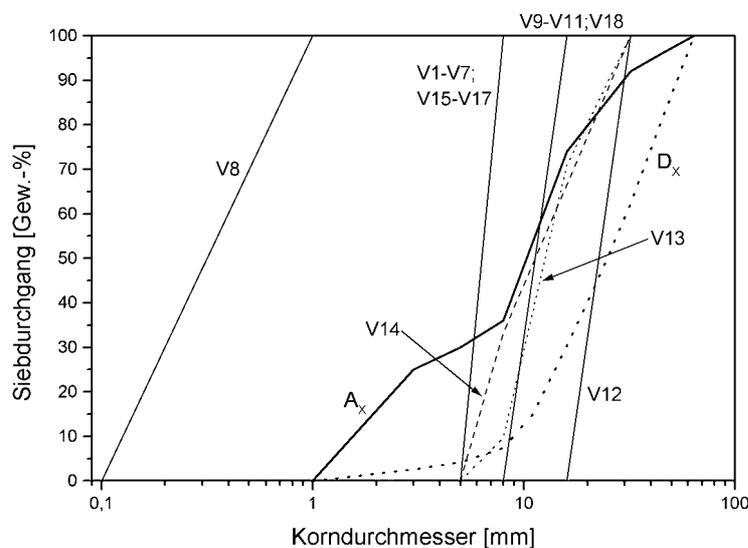


Abb. 2.23 Sieblinien des Zugabematerials, der Ausgangs- und der Deckschichtmischung

Hierzu wurden die Fraktionen 0 - 1 mm, 8 - 16 mm und 16 - 32 mm zugegeben. Die verwendeten Sieblinien sind in Abb. 2.23 zusammen mit der Ausgangs- und der Deckschichtmischung dargestellt. Die Fraktion 0 - 1 mm war nicht in dem ursprünglichen Sohlenmaterial enthalten und musste deshalb auch nicht eingefärbt werden. Anhand der Fraktion 8 - 16 mm, die im Bereich des mittleren Durchmessers d_m des Unterschichtmate-

rials liegt (vgl. Abb. 2.21), wurden wiederum verschiedene Zugaberaten untersucht. In den Versuchen V13 und V14 wurden Kornmischungen zugegeben. Für V13 wurde eine grobe Mischung gewählt, so dass eine oberstrom gerade erst aufgebrochene Deckschicht simuliert wurde. In V14 waren die drei verwendeten Fraktionen zu gleichen Teilen enthalten, so dass die Kornverteilung des Zugabematerials der Sieblinie des Unterschichtmaterials entspricht, der sich die Geschiebesieblinie bei länger anhaltendem Transport laut Naturuntersuchungen annähert (z.B. KUHNLE & WILLIS, 1992; LISLE, 1995; PARKER ET AL., 1982b). Tab. 2.3 fasst die Versuchsbedingungen mit verschiedenen Zugabefraktionen zusammen.

Tab. 2.3 *Versuche mit verschiedener Zugabefraktion*
 V13: Zugabemischung entspricht der Fraktion 8-16 mm mit Über- und Unterkorn
 V14: Zugabemischung enthält die drei Fraktionen im Verhältnis 1:1:1

Versuch	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14
Zugaberate g_{zu} [kg/m·min]	5	1,25	5	10	5	5	5
Zugabedauer T [min]	60	120	60	60	60	60	60
Zugabemenge Z [kg]	60	30	60	120	60	60	60
Zugabematerial d_{zu} [mm]	0 - 1	8 - 16	8 - 16	8 - 16	16 - 32	5 - 32	5 - 32

Schließlich wurde auch der Einfluss eines während der Zugabe erhöhten Durchflusses untersucht. In zwei Versuchen wurde die Anfangsdeckschicht bei einem um 0,8 l/s geringeren als dem kritischen Durchfluss hergestellt, d.h. bei $Q_1 = Q_c - 0,8 = 2,4$ l/s. Die Zugabe erfolgte dann wiederum bei dem kritischen Durchfluss. In zwei weiteren Versuchen war der Durchfluss während der Zugabe um 0,5 l/s höher als Q_c , d.h. $Q_{zu} = Q_c + 0,5 = 3,7$ l/s. Die Versuchsbedingungen sind in Tab. 2.4 zusammengestellt. Q_2 bezeichnet darin den Durchfluss, der am Ende der Zugabe eingestellt worden war.

Tab. 2.4 *Versuche bei unterschiedlichem Durchfluss während der Deckschichtbildung und der Zugabe*

Versuch	V15	V16	V17	V18
Zugaberate g_{zu} [kg/m·min]	5	5	5	5
Zugabedauer T [min]	60	60	60	60
Zugabemenge Z [kg]	60	60	60	60
Zugabematerial d_{zu} [mm]	5 - 8	5 - 8	5 - 8	8 - 16
Durchfluss zur 1. Abpflasterung Q_1 [l/s]	$< Q_c (2,4)$	$< Q_c (2,4)$	$= Q_c (3,2)$	$= Q_c (3,2)$
Durchfluss während der Zugabe Q_{zu} [l/s]	$= Q_c (3,2)$	$= Q_c (3,2)$	$> Q_c (3,7)$	$> Q_c (3,7)$
Durchfluss nach der Zugabe Q_2 [l/s]	$< Q_c (2,4)$	$= Q_c (3,2)$	$= Q_c (3,2)$	$= Q_c (3,2)$

2.4.4 Reproduzierbarkeit der Ergebnisse

Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse war bereits in Vorversuchen überprüft und bestätigt worden (KOLL & DITTRICH, 1998) und wurde zusätzlich durch Wiederholung des Versuchs V3 (insgesamt fünfmal) kontrolliert. Anhand dieses Versuchs wird die Streubreite der gemessenen Parameter diskutiert. Der Datensatz umfasst Transportraten und -mengen des mobilisierten Sohlenmaterials und des Zugabematerials, die Kornverteilung des erodierten Sohlenmaterials sowie mittlere Fließgeschwindigkeiten über der bewegten Sohle. Bei unbeweg-

ter Sohle wurde die Neigung, die Standardabweichung der Sohlenerhebung, der mittlere Korndurchmesser der Deckschicht und die mittlere Fließgeschwindigkeit jeweils vor und nach der Zugabe bestimmt.

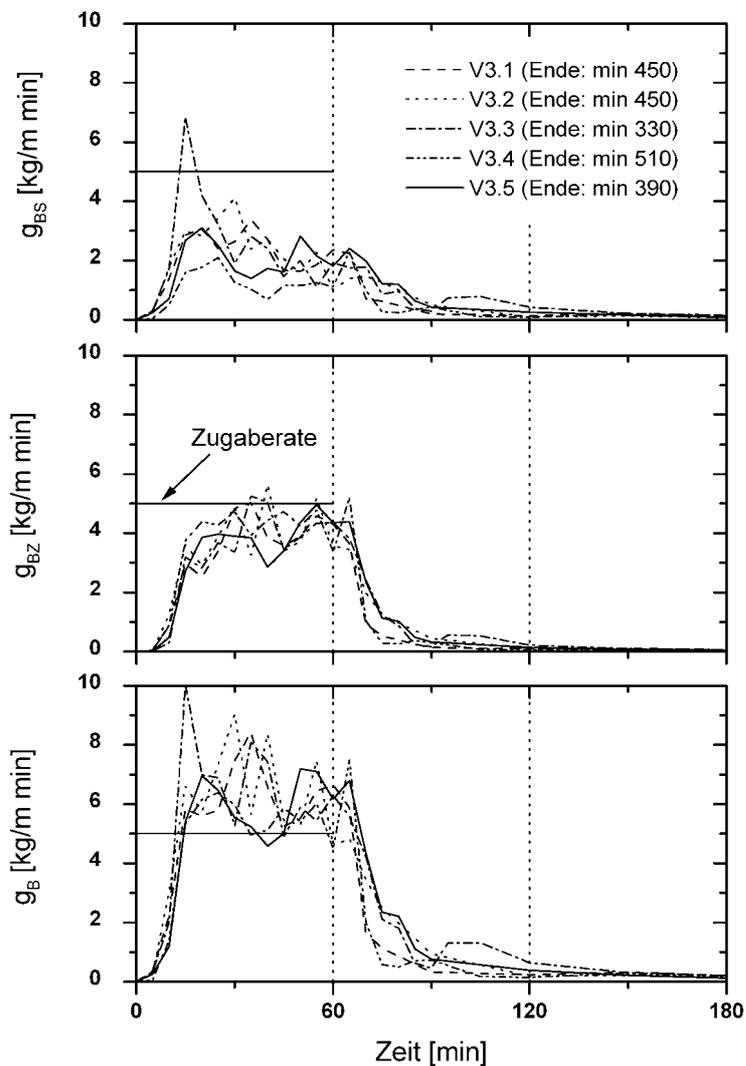


Abb. 2.24 Reproduzierbarkeit der Transportraten des Sohlenmaterials g_{BS} , des Zugabematerials g_{BZ} und des gesamten Geschiebes g_B für den fünfmal wiederholten Versuch V3 ($g_{zu} = 5 \text{ kg/m}\cdot\text{min}$, $T = 60 \text{ min}$, $d_{zu} = 5 - 8 \text{ mm}$)

Abb. 2.24 zeigt die Transportraten des Sohlenmaterials g_{BS} , des Zugabematerials g_{BZ} und der Summe aus beiden Materialien g_B sowie die bis zum Erreichen der Referenztransportrate von $0,017 \text{ kg/m}\cdot\text{min}$ erforderlichen Versuchszeiten. Während die Transportraten des Sohlenmaterials g_{BS} vor allem zu Beginn der Zugabe beim Vergleich der wiederholten Versuche eine recht große Streuung aufweisen, die sich auch in g_B widerspiegelt, ist in den Transportraten des Zugabematerials g_{BZ} nur eine geringe Streuung vorhanden. Der Transport erfolgt nicht kontinuierlich, sondern unterliegt Schwankungen, die in ihrer Größe vergleichbar, in ihrer Häufigkeit jedoch unregelmäßig sind. Die einzelnen Versuche weisen ein sehr ähnliches Verhalten im Anstieg der Transportraten auf, wohingegen leichte Unterschiede in den abnehmenden Transportraten des Zugabematerials und damit des Gesamtmaterials nach Ende der Zugabe bestehen. Dargestellt sind nur die ersten drei Stunden

der Versuche. Die Transportraten des Sohlenmaterials streuen nach der Zugabe deutlich stärker. Die zur Restabilisierung der Sohle erforderliche Zeit nach Zugabeende liegt zwischen 4,5 und 7,5 Stunden und ist nicht reproduzierbar.

Die Auftragung der während der Zugabe und der anschließenden Restabilisierung transportierten Mengen in Abb. 2.25 zeigt der Abb. 2.24 entsprechend einen sehr geringen Schwankungsbereich in der Menge des transportierten Zugabematerials TZ mit einer prozentualen Abweichung vom Mittelwert von maximal 7 %. Die Menge an erodiertem Sohlenmaterial TS weist eine starke Streuung von $\pm 30 \%$ auf. Besonders V3.4 weicht von den übrigen Versuchen ab, obwohl in der Versuchsdurchführung kein Unterschied bestand. Da jedoch deutlich

mehr Zugabe- als Sohlenmaterial transportiert wurde, beträgt die Abweichung vom Mittelwert für die Gesamtmenge TG nur ca. $\pm 10\%$.

Die Kornzusammensetzung des erodierten Sohlenmaterials wird durch den mittleren Korndurchmesser d_{mG} repräsentiert, der für die fünf wiederholten Versuche in Abb. 2.26 dargestellt ist. Der Verlauf des d_{mG} wurde der Übersichtlichkeit halber geglättet. Während der Zugabe und der ersten Stunde nach Beendigung der Zugabe liegen die mittleren Korndurchmesser der einzelnen Versuche recht dicht beieinander. In den folgenden Stunden der Restabilisierung der Deckschicht weichen die Kornverteilungen des erodierten Sohlenmaterials jedoch stark voneinander ab. Hierbei ist zu beachten, dass die Transportraten nur noch sehr gering waren, weshalb ein einzelnes größeres Korn das Ergebnis stark verzerren kann.

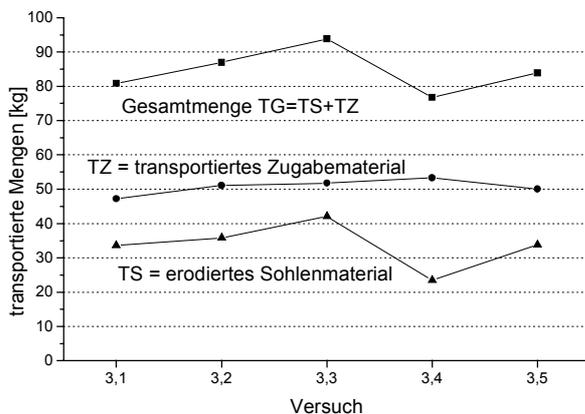


Abb. 2.25 Reproduzierbarkeit der während Zugabe und anschließender Restabilisierung transportierten Mengen

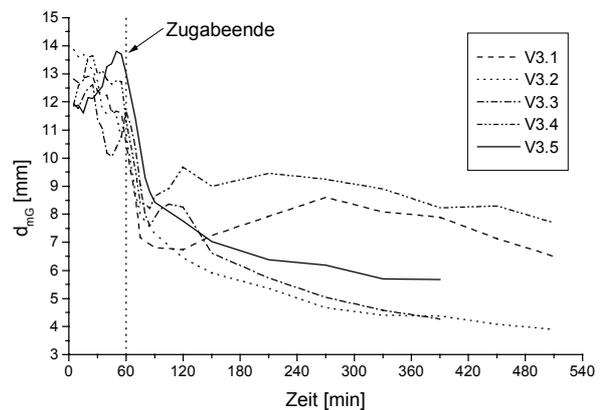


Abb. 2.26 Reproduzierbarkeit des mittleren Korndurchmessers d_{mG} des erodierten Sohlenmaterials

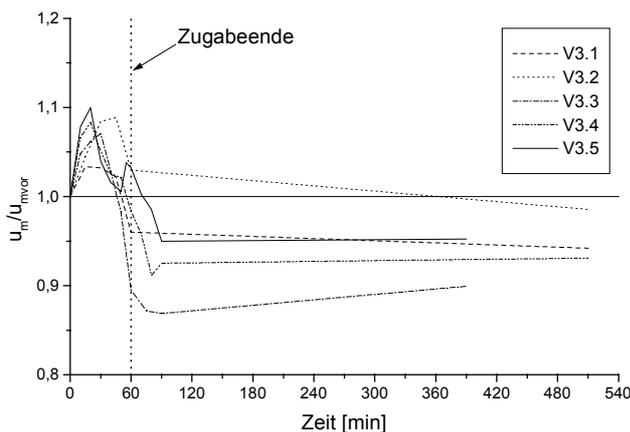


Abb. 2.27 Reproduzierbarkeit der mittleren Fließgeschwindigkeiten u_m bei bewegter Sohle

Die in Abb. 2.27 dargestellten Geschwindigkeiten sind ebenfalls geglättet. Zur Verdeutlichung der Änderung durch die Zugabe sind die Geschwindigkeiten jeweils auf die direkt vor Zugabebeginn gemessene Geschwindigkeit $u_{m\text{vor}}$ bezogen. Die Ergebnisse streuen zwar sehr stark, jedoch ist die Tendenz der erhöhten Geschwindigkeiten während der Zugabe und der geringeren Geschwindigkeiten nach der Restabilisierung eindeutig (siehe auch Abb. 2.28).

Die bei unbewegter Sohle erhobenen Parameter weisen eine unterschiedliche Streubreite vor und nach der Zugabe auf (Abb. 2.28). Die Zahlen in Klammern geben den Betrag der maximalen Abweichung vom Mittelwert an. Die größten Streubreiten sind bei der Standardabweichung der Sohlenerhebungen mit 15 % und beim mittleren Korndurchmesser der Deckschicht mit 16 % zu verzeichnen.

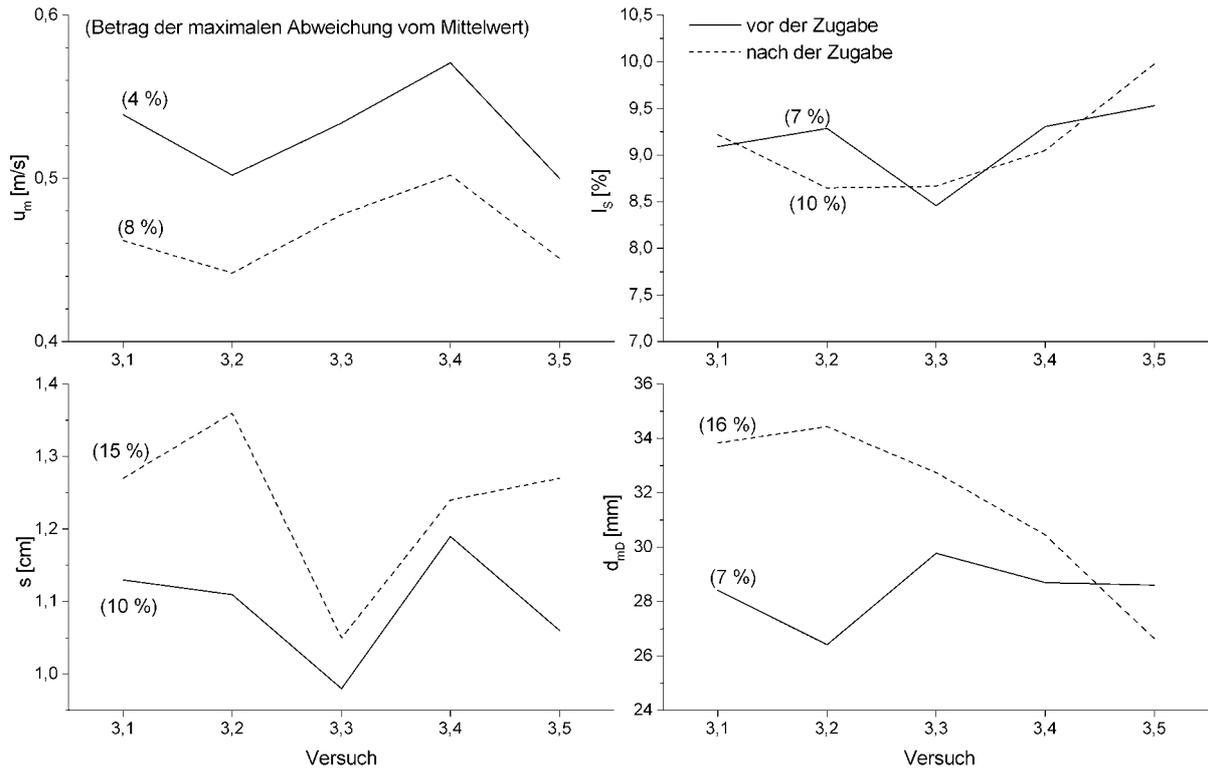


Abb. 2.28 Reproduzierbarkeit der mittleren Fließgeschwindigkeit u_m , der Sohlenneigung I_s , der Standardabweichung der Sohlenerhebungen s und des mittleren Korndurchmessers d_{mD} jeweils vor und nach der Zugabe

Die Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Versuche zeigt eine große Streubreite in den Ergebnissen, die das erodierte Sohlenmaterial betreffen. Der Grund liegt in der Herstellung der Deckschicht durch Selbststabilisierung. Dadurch war die Anfangsbedingung jedes Versuchs mit gewissen Schwankungen behaftet, die nicht weiter reduziert werden konnten. Die Streuung der die Sohle und das Sohlenmaterial betreffenden Parameter ist so groß, dass eine Quantifizierung nur bedingt möglich ist. Die qualitative Auswirkung der Zugabe ist jedoch gut beschreibbar.

Soweit möglich werden in der folgenden Analyse alle Wiederholungen von V3 berücksichtigt. Ist der Übersichtlichkeit halber die Darstellung nur eines Versuches möglich, wird V3 durch V3.5 repräsentiert, da dieser Versuch dem Mittel von V3.1 bis V3.5 am nächsten kommt.

2.5 Ergebnisse

Die über statischen Sohlen bei Klarwasserabfluss erhobenen Daten wurden im Rahmen der Arbeit von ABERLE (2000) ausgewertet und führten zu der Definition der Standardabweichung der Sohlenerhebungen s als Rauheitsmaß anstelle eines charakteristischen Korndurchmessers.

Den Fragen, wie eine bei Klarwasserabfluss stabile Deckschicht auf den Eintrag von externem Geschiebe reagiert und wie eine vorhandene Deckschicht den Transport von Geschiebe beeinflusst, wurde im Rahmen dieser Arbeit nachgegangen. Die aus den Untersuchungen erhaltenen Ergebnisse werden nachfolgend vorgestellt und erläutert. Hierzu werden die Auswirkungen der variierten Versuchsparameter (Zugabefraktion d_{zu} , Zugaberate g_{zu} , Zugabedauer T , Zugabemenge Z und Durchfluss während der Zugabe Q_{zu}) auf die Transportrate und -menge, die Kornzusammensetzung des erodierten Sohlenmaterials, die Fließgeschwindigkeit sowie die vor und nach der Zugabe gemessenen Parameter u_m , I_s , s und d_{mD} untersucht. Die zusammenführende Diskussion der Ergebnisse erfolgt in Kap. 2.6.

2.5.1 Transportraten

Der Verlauf der Transportraten des Sohlenmaterials g_{BS} , des Zugabematerials g_{BZ} und der Summe aus den beiden g_B wird zunächst anhand der in Abb. 2.29 dargestellten Transportraten des Versuchs V3 beschrieben.

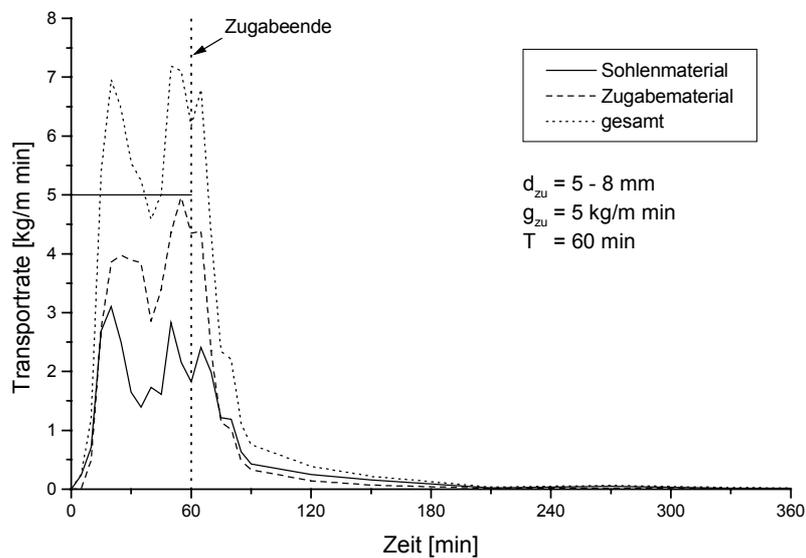


Abb. 2.29 Transportraten des Versuchs V3 ($d_{zu} = 5 - 8 \text{ mm}$; $g_{zu} = 5 \text{ kg/m} \cdot \text{min}$; $T = 60 \text{ min}$)

Nach einer gewissen Verzögerung steigen die Transportraten des Zugabe- und des Sohlenmaterials an, so dass die Gesamttransportrate die Zugaberate im gezeigten Beispiel nach 15 min überschreitet. Trotz des konstanten Durchflusses und der kontinuierlichen Zugabe erfolgt der Transport nicht gleichmäßig, sondern ist Schwankungen unterlegen, die dazu führen, dass g_{zu} bei min 40 kurzfristig sogar unterschritten wird. Im Mittel bleibt die Gesamttransportrate während der Zugabe jedoch oberhalb der Zugaberate. Ebenso wie der Transport mit einer Verzögerung beginnt, nehmen auch die Transportraten nicht augenblicklich mit

dem Ende der Zugabe ab. Die Gesamttransportrate ist 2,5 Stunden (min 210) nach Zugabeende mit $g_B = 0,033 \text{ kg/m} \cdot \text{min}$ fast vernachlässigbar. Die festgelegte Referenztransportrate von $0,017 \text{ kg/m} \cdot \text{min}$ wird in diesem Versuch jedoch erst nach weiteren drei Stunden (min 390) erreicht.

Die Auftragung des Anteils von Sohlen- und Zugabematerial am Geschiebe über die Zeit (Abb. 2.30) verdeutlicht den Zusammenhang zwischen der Geschiebezusammensetzung und der Gesamttransportrate. Am Beginn des Versuchs besteht das Geschiebe bis zu dem Zeitpunkt, zu dem die Gesamttransportrate die Zugaberate überschreitet (min 15), überwiegend aus Sohlenmaterial. Der Anteil des Sohlenmaterials am Geschiebe nimmt mit fortdauernder Zugabe ab, während der Anteil des transportierten Zugabematerials steigt und sich der Zugaberate nähert (vgl. Abb. 2.29). Wiederum etwa 15 min nach dem Zugabeende, wenn die Gesamttransportrate deutlich unter die Zugaberate gesunken ist, besteht das Geschiebe erneut zu über 50 % aus Sohlenmaterial.

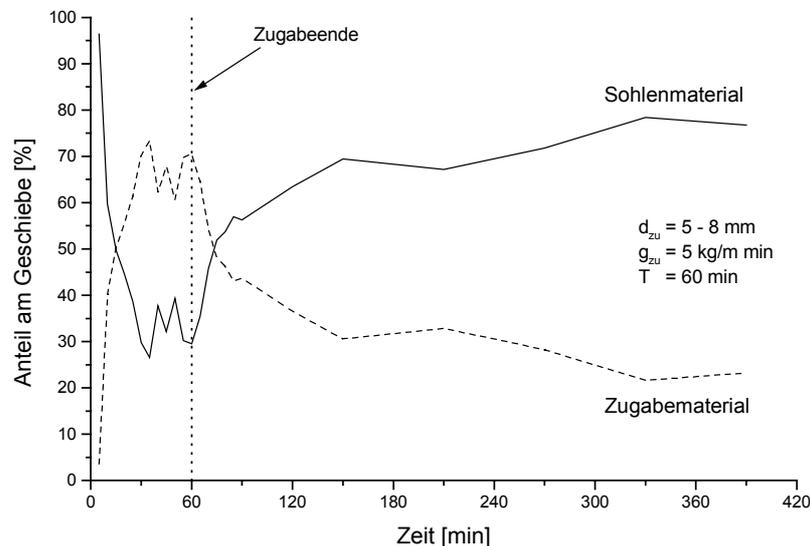


Abb. 2.30 Anteil von Sohlen- und Zugabematerial am Geschiebe für V3

Zugabedauer und -rate für $d_{zu} = 5 - 8 \text{ mm}$

Mit Verlängerung der Zugabedauer (V4: $T = 120 \text{ min}$, siehe Anhang A5; V5: $T = 480 \text{ min}$, Abb. 2.31) bleibt bei gleicher Zugaberate und -fraktion die beschriebene Tendenz erhalten. Die dabei feststellbaren Abweichungen in den Transportraten des Sohlenmaterials am Beginn der Zugabe sind auf geringfügig unterschiedliche Anfangsbedingungen der Versuche zurückzuführen (siehe Kap. 2.4.4).

In V5 (Abb. 2.31) ist durch die langanhaltende Zugabe nach 4,5 Stunden (min 270) konstanter Randbedingungen ein mobiles Gleichgewicht erreicht, d.h. die Geschiebetransportrate g_B entsprach etwa der Zugaberate g_{zu} und das Geschiebe bestand zu ca. 96 % aus Zugabematerial. Dieses Gleichgewicht wurde durch eine geringfügige Änderung der Zusammensetzung des Zugabematerials (5 % der Fraktion 3 - 5 mm, 90 % der Fraktion 5 - 8 mm und 5 % der Fraktion 8 - 16 mm) ab min 330 soweit gestört, dass der Anteil des Sohlenmaterials am Geschiebe ab min 370 wieder auf über 15 % anstieg und die Schwankungen in g_B wieder zunahmen.

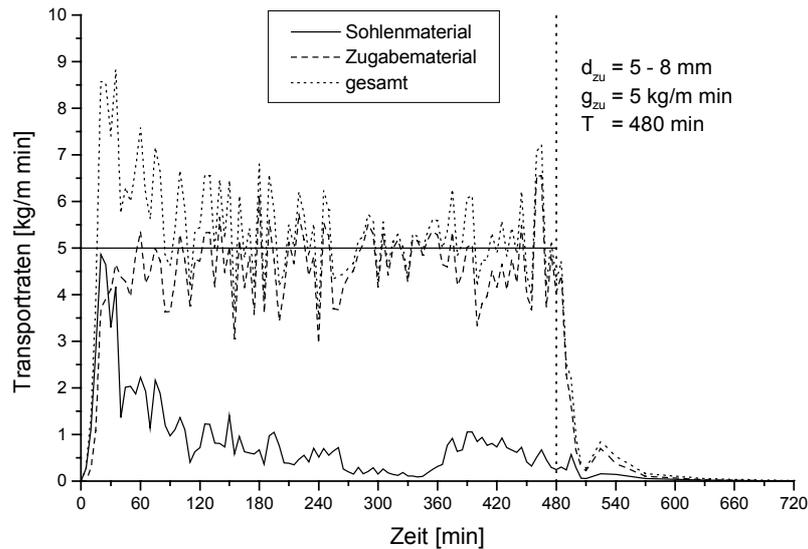


Abb. 2.31 Transportraten des Versuchs V5 ($d_{zu} = 5 - 8 \text{ mm}$; $g_{zu} = 5 \text{ kg/m}\cdot\text{min}$; $T = 480 \text{ min}$)

Die Verzögerung im Anstieg der Transportrate des Zugabematerials und der zu Versuchsbeginn hohe Anteil an erodiertem Sohlenmaterial deuten darauf hin, dass das Zugabematerial zunächst zum größten Teil in vorhandenen Lücken und Pools abgelagert wird. Dadurch wird lokal das Strömungsfeld verändert und zuvor stabiles Sohlenmaterial mobilisiert. Erst wenn keine Ablagerungsmöglichkeiten mehr vorhanden sind, wird weiterhin zugegebenes Material über die neu entstandene Sohlenoberfläche hinweg transportiert. Diese Aussage wird durch den Einfluss der Zugaberate auf den Anstieg der Transportrate des Zugabematerials (Abb. 2.32) bestätigt. Die Transportraten g_{BS} , g_{BZ} und g_B sind jeweils mit der Zugaberate g_{zu} normiert.

Die Schwankungen in den Transportraten während und auch nach der Zugabe werden relativ zu g_{zu} mit steigender Zugaberate deutlich reduziert. g_{BZ} und damit auch g_B steigen nach Beginn der Zugabe schneller an und nehmen nach Zugabeende schneller wieder ab. Diese Tendenz ist in den Transportraten des erodierten Sohlenmaterials nicht eindeutig zu erkennen. Jedoch ist offensichtlich, dass das Verhältnis von g_{BS} zu g_{zu} mit steigender Zugaberate von über 1 bei $g_{zu} = 1,25 \text{ kg/m}\cdot\text{min}$ auf nahezu 0 bei $g_{zu} = 40 \text{ kg/m}\cdot\text{min}$ sinkt, d.h. bei geringen Zugaberaten wird im Verhältnis zum eingetragenen Geschiebe mehr Material mobilisiert als bei hohen Zugaberaten. Absolut wird jedoch umso mehr Sohlenmaterial mobilisiert, je mehr Geschiebe eingetragen wird, wie in der Diskussion der transportierten Mengen gezeigt wird. Ebenso wie g_{BS}/g_{zu} von hohen Werten her gegen 1 geht, nimmt auch g_B/g_{zu} von Werten deutlich über 1 mit steigender Zugaberate ab, wohingegen das Verhältnis g_{BZ}/g_{zu} von Werten kleiner 1 kommend steigt. Im Mittel sinkt die Gesamttransportrate nicht unter die Zugaberate ab, d.h. je mehr Material der Fraktion 5 - 8 mm zugegeben wird, desto mehr wird auch transportiert. Zur Verdeutlichung der Größenordnung der in V7 zugegebenen Menge von 480 kg sei erwähnt, dass sich vor Zugabebeginn ca. 250 kg Sohlenmaterial in der Rinne befanden. Es wurde also etwa die doppelte Menge an Material zugegeben, als Sohlenmaterial vorhanden war.

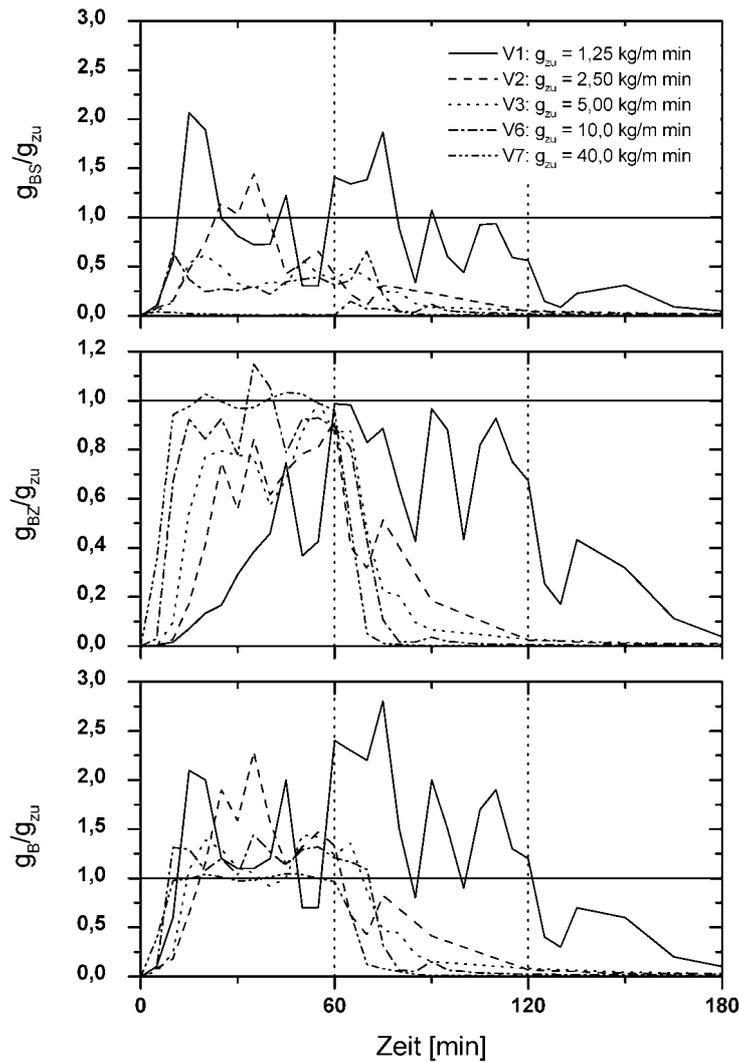


Abb. 2.32 Normierte Transportraten als Funktion der Zugaberate für $d_{zu} = 5 - 8 \text{ mm}$
(V1: $T = 120 \text{ min}$; V2, V3, V6, V7: $T = 60 \text{ min}$)

Mit Versuch V7 wurde wie bereits in V5 eine mobile Deckschicht erreicht, jedoch nicht aufgrund der Dauer, sondern wegen der hohen Zugaberate von $40 \text{ kg/m}\cdot\text{min}$. Wie aus Abb. 2.33 ersichtlich ist, wurde von Anfang an mehr Zugabe- als Sohlenmaterial transportiert, so dass der in den anderen Versuchen beobachtete anfängliche Peak in der Transportrate des Sohlenmaterials nur minimal war. Ab min 10 bestand das Geschiebe während der Zugabe zu maximal 3,4 % aus Sohlenmaterial. Mit dem Ende der Zugabe steigt der Anteil an erodiertem Sohlenmaterial von 0,8 % bei min 60 sprunghaft auf 23,2 % bei min 65 an und steigt weiter bis zum Ende des Versuchs. Die Sohle wurde aufgrund der hohen Zugaberate sofort zugeeckt, so dass die anfängliche Restrukturierung und Anpassung der Sohle an die mit Beginn der Zugabe veränderten Randbedingungen, die in V1 besonders ausgeprägt ist, nicht stattfinden konnten. Mit dem Austrag des Zugabematerials nach Zugabeende wurde dann das Sohlenmaterial mitgerissen.

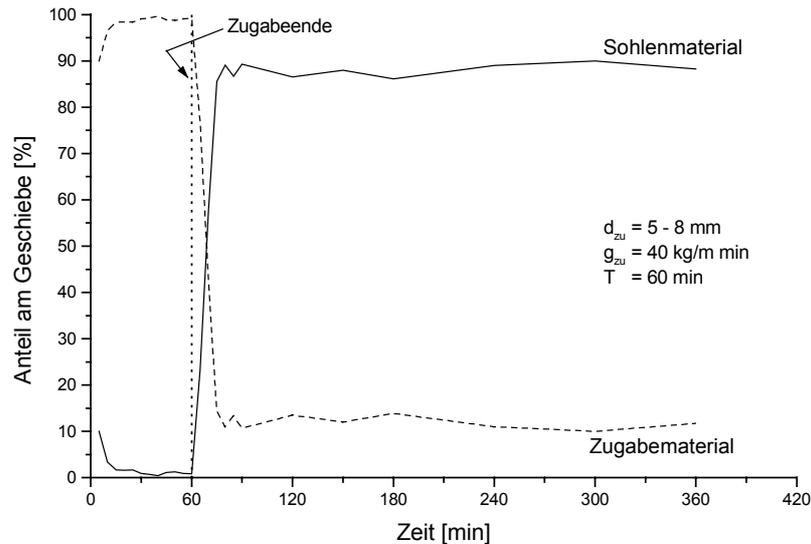


Abb. 2.33 Anteil von Sohlen- und Zugabematerial am Geschiebe für V7

Zugaberate für $d_{zu} = 8 - 16 \text{ mm}$

Die Darstellung der mit g_{zu} normierten Transportraten für verschiedene Zugaberaten des Materials 8 - 16 mm in Abb. 2.34 zeigt zunächst ein ähnliches Verhalten wie für das Zugabematerial 5 - 8 mm (Abb. 2.32). Je höher die Zugaberate ist, desto schneller steigt die Zugabe- und damit die Gesamttransportrate an, desto mehr nähert sich g_{BZ} der Zugaberate und desto geringer sind die Schwankungen im Transport. Allerdings wird deutlich weniger Zugabematerial und vor allem Sohlenmaterial transportiert, so dass die Gesamttransportraten im Mittel kleiner als die Zugaberaten sind. Das weniger mobile Zugabematerial bewirkt also geringere Umordnungen der statischen Deckschicht. Erst in V11 erreicht g_{BZ} und damit g_B die Zugaberate von $10 \text{ kg/m}\cdot\text{min}$, so dass dieser Versuch von der Größenordnung her etwa mit V3 vergleichbar ist. Wie erwähnt, ist g_{BS} mit im Mittel $0,83 \text{ kg/m}\cdot\text{min}$ während der Zugabe jedoch deutlich geringer als in V3 (Mittelwert während der Zugabe: $g_{BS} = 1,87 \text{ kg/m}\cdot\text{min}$).

Das Zugabematerial bleibt im Einlaufbereich liegen und bildet eine Schicht oder Rampe (siehe Abb. 2.35). Weiterhin zugegebenes Material wird über die jetzt glattere Oberfläche der Sohle hinweg transportiert und an ihrem unterstromigen Ende abgelagert. Auf diese Weise schiebt sich die Schicht aus Zugabematerial langsam nach unterstrom, wobei die zum Bedecken der Sohle erforderliche Zeit von der Zugaberate und der Korngröße des Zugabematerials abhängig ist. Die im Vergleich zu V1 und V3 deutlich niedrigeren Transportraten des Sohlenmaterials in V9 und V10 zeigen, dass sich die durch die Ablagerungen veränderten Strömungsbedingungen nur lokal begrenzt auswirken.

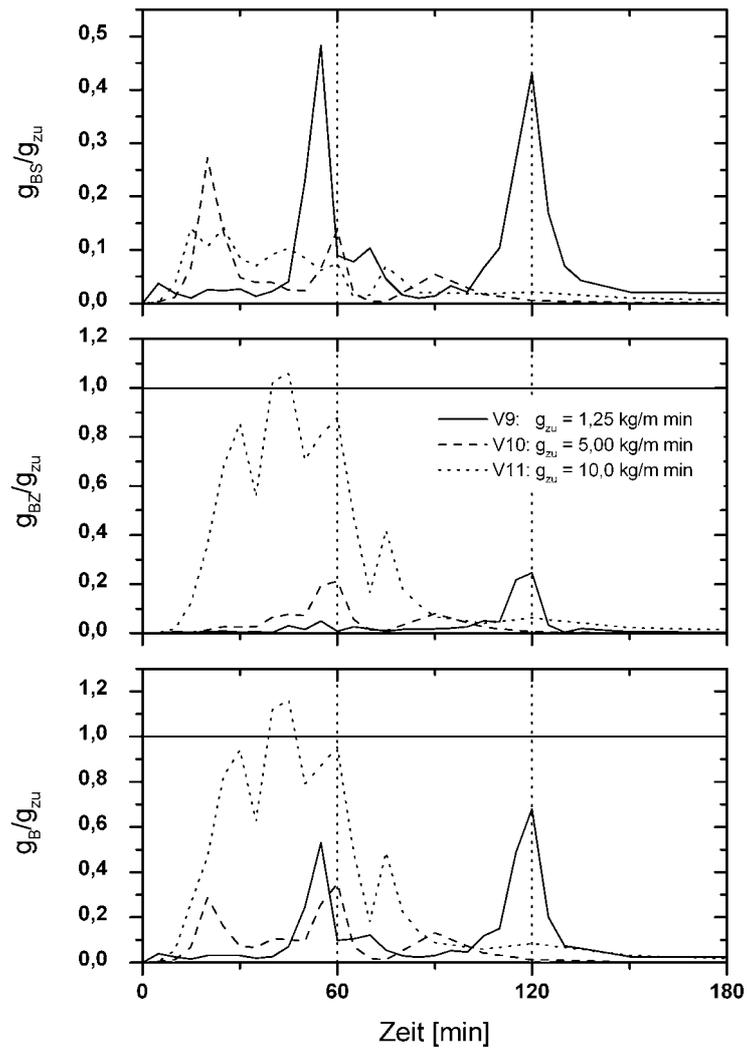


Abb. 2.34 Normierte Transportraten als Funktion der Zugaberate für $d_{zu} = 8 - 16 \text{ mm}$ (V9: $T = 120 \text{ min}$; V10, V11: $T = 60 \text{ min}$)



Abb. 2.35 Aufnahme der Schicht aus Zugabematerial am Ende des Versuchs V9

Zugabefraktion

Die unterschiedlichen Auswirkungen von eingetragem Geschiebe in Abhängigkeit der Korngröße des Zugabematerials verdeutlicht Abb. 2.36. Die Zugaberate betrug jeweils $5 \text{ kg/m} \cdot \text{min}$ und die Zugabedauer $T = 60 \text{ min}$.

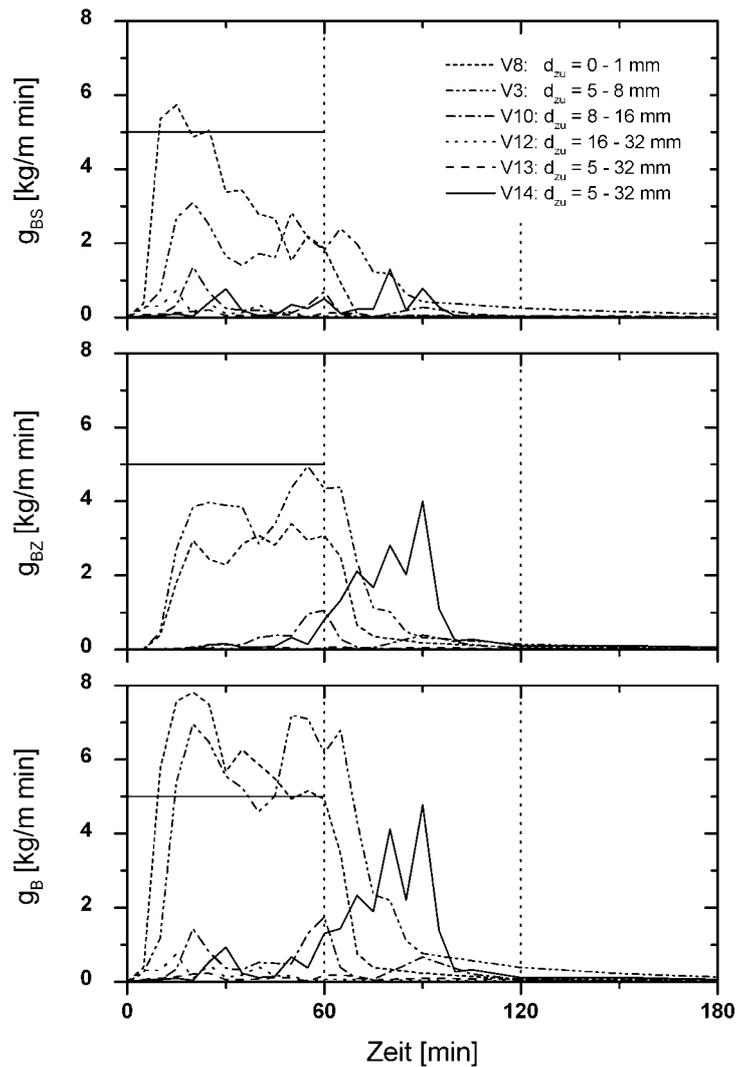


Abb. 2.36 Transportraten als Funktion der Zugabefraktion

Im Gegensatz zu den Untersuchungen von EGASHIRA & ASHIDA (1991), die trotz einer Zugaberate von $9,73 \text{ kg/m}\cdot\text{min}$ keine Mobilisierung von Sohlenmaterial beobachten konnten (siehe Kap. 2.1.8), führte in den hier vorgestellten Versuchen die kleinste Zugabefraktion also zu den größten Transportraten g_{BS} , die sogar über der Zugaberate liegen (V8). Die Transportraten des Zugabematerials erreichen jedoch nicht die Größe von g_{ZU} , da ein Großteil des Sandes in den vorhandenen Sohlenkörper durch die starken Umlagerungen der Sohle eingemischt wurde. Darüber hinaus ist zu beachten, dass ein Teil des Zugabematerials in Schwebelagerung transportiert wurde und nicht in dem Sedimentkorb am Ende der Rinne aufgefangen werden konnte.

Die bereits für das Zugabematerial 8 - 16 mm beschriebene Rampenbildung war in V12 noch ausgeprägter. Erst durch Überschreiten des inneren Reibungswinkels rutschte Zugabematerial nach unterstrom. Eine Erhöhung des Strömungsangriffs durch einen Aufstau des Wassers oberstrom des abgelagerten Zugabematerials erfolgte nicht, da die entstandene Rampe durchlässig war. Dementsprechend sind die im Vergleich zu V10 deutlich geringeren Transportraten in V13 (siehe Abb. 2.36) auf den Anteil von 30 % der Fraktion 16 - 32 mm zurückzuführen. Der geringe Anteil der Fraktion 5 - 8 mm von 10 % hat keine Auswirkungen.

Je kleiner die Zugabefraktion ist, desto mehr Sohlenmaterial wird also vor allem am Zugabebeginn mobilisiert und desto größer ist die Gesamttransportrate. JACKSON & BESCHTA (1984) sowie HASSAN & CHURCH (2000) führten die Mobilisierung von Sohlenmaterial auf den durch den Eintrag von feinem Geschiebe verringerten maßgebenden d_m der Mischung aus Zugabe- und Sohlenmaterial zurück (Kap. 2.1.8). Diese Begründung impliziert, dass erst eine gewisse Menge an Zugabematerial eingetragen werden muss, bevor dann die Transportraten des Sohlen- und des Zugabematerials gleichzeitig ansteigen. Beobachtet wurde jedoch, dass das Sohlenmaterial vor allem in den ersten Minuten nach Zugabebeginn transportiert wird und der steigende Transport des Zugabematerials mit sinkenden Transportraten des Sohlenmaterials verbunden ist. Außerdem kann die Vermischung der beiden Materialien erst aufgrund der Bewegung des Sohlenmaterials erfolgen. Der vermehrte Transport von Sohlenmaterial wird deshalb weniger auf einen verminderten maßgebenden Korndurchmesser der Deckschicht zurückgeführt, als vielmehr auf die Mobilität des eingetragenen Geschiebes. Durch die höhere Transportgeschwindigkeit der zugegebenen Partikel treten häufiger lokale Strömungsänderungen auf und möglicherweise wird das Sohlenmaterial durch zusätzliche Impulse sozusagen losgeschlagen. Bei gleicher Masse ist dabei für einen höheren Impuls eine höhere Geschwindigkeit erforderlich. Die Fließgeschwindigkeiten werden in Kap. 2.5.4 analysiert.

Ein von allen anderen Versuchen abweichendes Verhalten zeigt Versuch V14, in dem die Zugabekornmischung ungefähr der Ausgangsmischung entsprach. Nach Zugabeende nehmen die Transportraten nicht wie erwartet ab, sondern steigen weiter an. Erst eine halbe Stunde nach Zugabeende lässt der Transport vor allem des Zugabematerials plötzlich nach. Die Auftragung der Transportraten der einzelnen Fraktionen des Zugabematerials in Abb. 2.37 zeigt, dass in den ersten 20 Minuten praktisch kein Zugabematerial transportiert wurde. Anschließend steigt erst der Transport der größten Fraktion an, dann folgt derjenige der mittleren Fraktion und die kleinsten Zugabekörner werden erst eine Stunde nach Zugabebeginn ausgetragen. Nach dem Zugabeende steigt der Transport aller drei Fraktionen in annähernd gleichem Maße an, wobei die Transportrate der Fraktion 5 - 8 mm stets geringer als die der Fraktionen 8 - 16 und 16 - 32 mm ist, die wiederum etwa gleich groß sind.

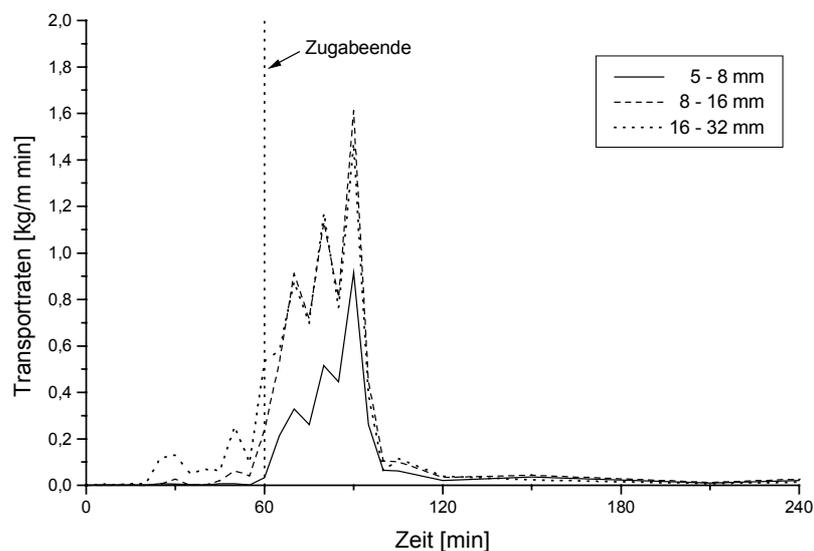


Abb. 2.37 Transportraten der Zugabefractionen in V14 ($g_{zu} = 5 \text{ kg/m} \cdot \text{min}$)

Da die Transportrate des Sohlenmaterials durchgehend geringer als die des Zugabematerials ist (Abb. 2.36), kann dieses Verhalten nicht durch den Entzug der stützenden Grundlage für die größeren Körner erklärt werden. Vielmehr scheinen nach unterstrom gerichtete Sortierungseffekte des Zugabematerials dafür verantwortlich zu sein. Das kleinste Zugabematerial wird am schnellsten transportiert und füllt die Lücken und Pools der vorhandenen Deckschicht auf (Abb. 2.38). Es nimmt aber gleichzeitig eine gewisse Menge an größerem Zugabematerial mit, das dadurch schneller transportiert wird als in den Versuchen mit Einkornzugabe. Die größeren Fraktionen stützen die Schicht aus Zugabematerial, so dass die Transportrate der Fraktion 5 - 8 mm nicht wie in den vergleichbaren Einkorn-Versuchen ansteigt. Die größten Fraktionen bleiben relativ weit oberstrom liegen. Ist die Sohle durch Ablagerungen eingeebnet und die Neigung an die veränderten Randbedingungen angepasst, können die größten Körner transportiert werden und mobilisieren dadurch wiederum kleinere Fraktionen, so dass die Transportraten aller drei Fraktionen ansteigen. Das Erreichen dieses Zustandes gerade mit dem Zugabeende ist auf die Kombination aus der Topographie der Sohle und der Zugaberate zurückzuführen.

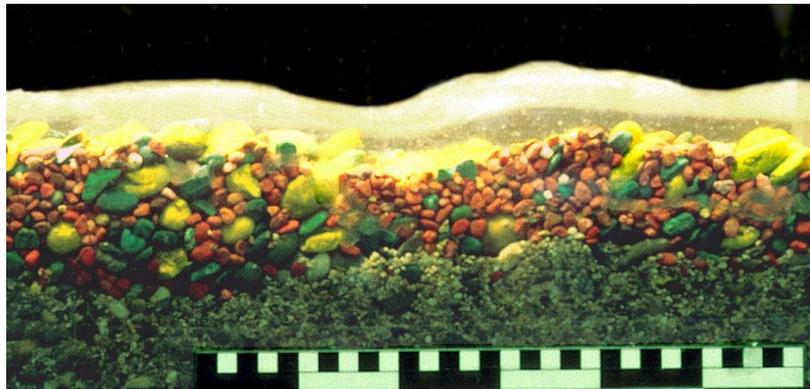


Abb. 2.38 Aufnahme der Schicht aus Zugabematerial 20 min nach Zugabebeginn von V14

Die durch den Eintrag von externem Geschiebe hervorgerufene Reaktion der Sohle ist also neben der Zugaberate in entscheidendem Maße von der Mobilität des Zugabematerials abhängig. Nach ABERLE (2000) berechnet sich der kritische Durchfluss der am Zugabebeginn vorhandenen Deckschicht unter Verwendung der Standardabweichung der Sohlenerhebungen $s = 10,8$ mm zu $Q_c = 3,39$ l/s (Gl. 2.15a) und unter Verwendung des $d_{mD} = 28,14$ mm zu $Q_c = 3,52$ l/s (Gl. 2.25b). Der tatsächliche kritische Durchfluss von 3,2 l/s ist nach den Formeln von PALT (2001) (Gl. 2.16b) und RICKENMANN (1990) (Gl. 2.20b) um das Dreifache bzw. Doppelte zu hoch. Die Abschätzung der kritischen Durchflüsse der Zugabematerialien (Tab. 2.5) erfolgt deshalb mit Gl. (2.15a), wobei d_m anstelle der für das lockere Material unbekannt Standardabweichung s eingesetzt wird. Gl. (2.15b) liefert zu geringe Werte.

Tab. 2.5 Kritischer Durchfluss der Zugabematerialien

Material	0 - 1 mm	5 - 8 mm	8 - 16 mm	16 - 32 mm	5 - 32 mm V13	5 - 32 mm V14
d_m [mm]	0,5	6,5	12	24	14,95	14,17
Q_c [l/s]	0,04	1,55	4,00	10,96	5,98	5,56

Durchfluss während der Zugabe

Die Versuche, in denen der vorliegende Durchfluss (3,2 l/s) deutlich über dem kritischen Durchfluss des Zugabematerials liegt ($d_{zu} = 0 - 1 \text{ mm}$ und $5 - 8 \text{ mm}$), führen zu hohen Transportraten des Sohlenmaterials. Zwar wird ein Teil des Zugabematerials auf der Sohle abgelagert, aber es wird kein Bestandteil der vorhandenen Deckschicht und bleibt somit mobil. Hingegen wird nur sehr wenig Sohlenmaterial durch die Zugabe von Fraktionen mobilisiert, deren kritischer Durchfluss deutlich über dem herrschenden Durchfluss liegt. Die Stabilität der Kornmischung von V13 scheint dabei unterschätzt zu werden. Obwohl die Mischung zu 60 % aus der Fraktion 8 - 16 mm und nur zu 30 % aus der Fraktion 16 - 32 mm besteht, sind die Transportraten eher mit V12 als mit V10 vergleichbar (siehe Abb. 2.36). Entsprechend wird die Stabilität der in V14 verwendeten Kornmischung überschätzt. Durch den hohen Anteil an der Fraktion 5 - 8 mm ist die Mischung mobiler als die in V13 verwendete und auch als im Versuch V10, in dem nur Körner der Größe 8 - 16 mm zugegeben wurden.

Der zum Bewegungsbeginn führende Durchfluss der Fraktion 8 - 16 mm liegt nur knapp über dem bei Zugabebeginn herrschenden Durchfluss von 3,2 l/s. Da die verwendete Gleichung von ABERLE (2000) unter Berücksichtigung stabilisierender Sohlenstrukturen aufgestellt wurde, kann der kritische Durchfluss bei ebener Sohle durchaus geringer sein. Die in Abb. 2.34 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die Sohle erst mit Zugabematerial bedeckt sein muss bevor die Transportraten ansteigen. Die Transportraten des Sohlenmaterials sind jedenfalls geringer, wenn der kritische Durchfluss des Zugabematerials nicht von Anfang an überschritten ist (vgl. Abb. 2.32).

Das in der Sohle verbliebene Zugabematerial führte im allgemeinen nicht zu einer Erhöhung der Sohlenstabilität, wie die Durchflusserhöhung nach der Zugabe zeigte. Vielmehr wurde es zusammen mit einem vergleichbar hohen Anteil an Sohlenmaterial ausgetragen. Lediglich das sehr grobe Zugabematerial der Versuche V12 und V13 ermöglichte die Erhöhung des kritischen Durchflusses auf 4,6 l/s resp. 3,7 l/s.

Wird der Durchfluss mit Beginn der Zugabe von 3,2 l/s auf 3,7 l/s erhöht, verhalten sich die Versuche V17 ($d_{zu} = 5 - 8 \text{ mm}$) und V18 ($d_{zu} = 8 - 16 \text{ mm}$) unabhängig von der Zugabefraktion (Abb. 2.39). Die Transportraten in V18 unterliegen zwar stärkeren Schwankungen als in V17, aber die Größenordnungen von g_{BS} und g_B sind vergleichbar. Ein Unterschied besteht im Transport des Zugabematerials. Bei Verwendung der Fraktion 8 - 16 mm wird zunächst wieder die Sohle mit dem Zugabematerial bedeckt bevor die Transportrate g_{BZ} die Zugaberate erreicht. Zum Vergleich ist in Abb. 2.39 auch die Transportrate des Versuchs V0.2 bei Erhöhung von 3,2 l/s auf 3,7 l/s dargestellt. Offensichtlich wird durch die Zugabe deutlich mehr Sohlenmaterial mobilisiert als bei Erhöhung des Durchflusses ohne gleichzeitige Geschiebezugabe. Eine Verzögerung des Transports des Sohlenmaterials aufgrund des Eintrags von externem Geschiebe erfolgt nicht.

In Abb. 2.39 sind darüber hinaus die Transportraten des Versuchs V12 bei Erhöhung des Durchflusses auf 3,7 l/s (V12.2) dargestellt. Die Transportrate des Sohlenmaterials ist zunächst mit V0.2 vergleichbar. Dadurch, dass das nach der Zugabe in der Rinne verbliebene Zugabematerial durch den erhöhten Strömungsangriff über die Sohle verteilt wurde, sinkt die Gesamttransportrate jedoch sehr schnell unter die definierte Referenztransportrate. Bereits nach 30 min war der Geschiebetransport vernachlässigbar gering.

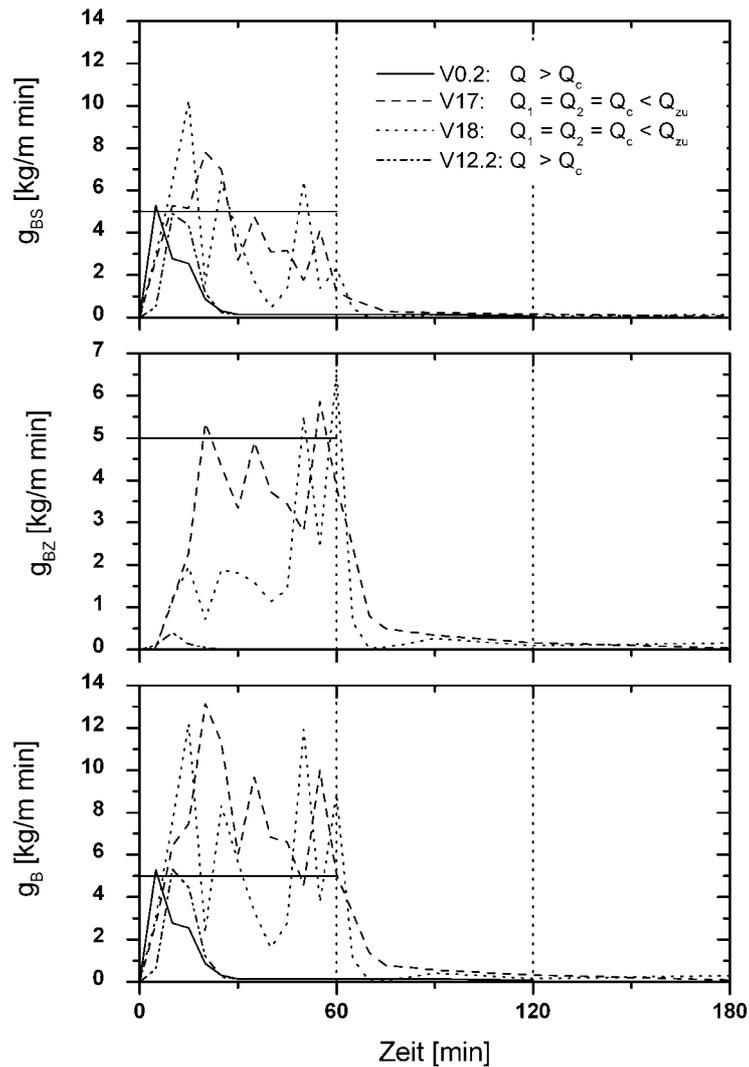


Abb. 2.39 Transportraten der Versuche mit Durchflusserhöhung ausgehend von der Deckschicht bei $Q_1 = Q_c = 3,2 \text{ l/s}$ (V0.2: ohne Zugabe, V17: $d_{zu} = 5 - 8 \text{ mm}$, V18: $d_{zu} = 8 - 16 \text{ mm}$, V12.2: Erhöhung auf $Q = 3,7 \text{ l/s}$)

In Abb. 2.40 sind diejenigen Transportraten einander gegenübergestellt, die ausgehend von der weniger stabilen Deckschicht (hergestellt bei $2,4 \text{ l/s}$) aus der Durchflusserhöhung mit und ohne Zugabe der Fraktion $5 - 8 \text{ mm}$ resultieren. Weiterhin sind die Transportraten von V3 dargestellt, die nur durch die Zugabe verursacht wurden. Die Transportrate des Sohlenmaterials ist am höchsten, wenn gleichzeitig der kritische Durchfluss der vorhandenen Deckschicht überschritten und externes Geschiebe eingetragen wird, wobei eine geringere Anfangsstabilität der Deckschicht zu einer höheren Transportrate führt. Am niedrigsten ist sie, wenn das Sohlenmaterial nur aufgrund von Geschiebeeintrag erodiert wird. Die Transportraten des Zugabematerials der Versuche V3 und V15, V16 sind untereinander vergleichbar.

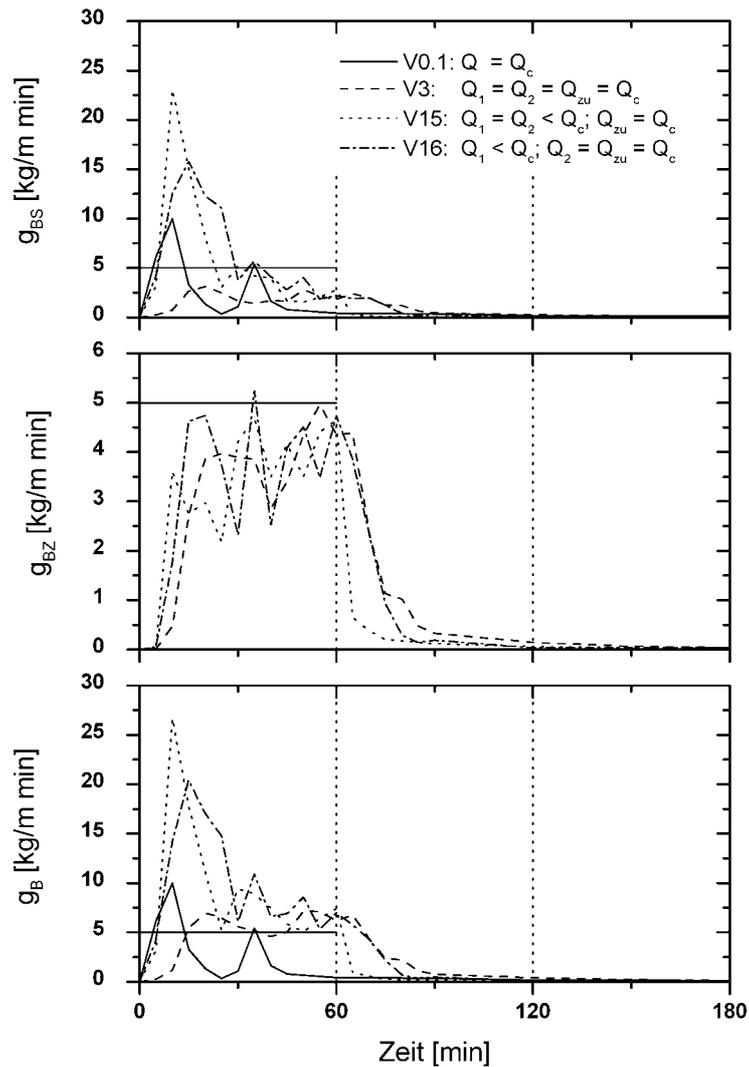


Abb. 2.40 Transportraten der Versuche mit Durchflusserhöhung ausgehend von der Deckschicht bei $Q_1 = 2,4 \text{ l/s}$ (V0.1: ohne Zugabe, V15 und V16: $d_{zu} = 5 - 8 \text{ mm}$) sowie V3

Die Analyse der Transportraten zeigt, dass durch den Eintrag von Geschiebe in einen mit einer statischen Deckschicht stabilisierten Abschnitt grundsätzlich Sohlenmaterial mobilisiert wird, auch wenn der kritische Durchfluss der Deckschicht nicht überschritten wird. Die Transportraten des Sohlenmaterials steigen dabei mit der Zugaberate und nehmen mit größer werdender Zugabefraktion ab. Da jedoch die Transportraten vor allem des Sohlenmaterials sehr stark schwanken und teilweise im Verlauf der Zugabe deutlich abnehmen, ist es schwierig zu beurteilen, ob und wie stark die Deckschicht tatsächlich umstrukturiert wird. Ein mögliches Kriterium hierfür ist die Menge an erodiertem Sohlenmaterial, die im folgenden Abschnitt analysiert wird.

2.5.2 Transportierte Mengen

Ein mögliches Kriterium zur Abschätzung der Auswirkungen des Geschiebeeintrags auf die Stabilität der vorhandenen Deckschicht ist, wie oben erwähnt, die Menge des erodierten Sohlenmaterials. Zur Beurteilung der Größenordnung der erodierten Mengen an Sohlenmaterial werden sie zu den bei Klarwasserabfluss erodierten Mengen des Versuchs V0 ins Ver-

hältnis gesetzt. Für die Versuche V1 bis V16 wird die durch die Erhöhung von 2,4 auf 3,2 l/s (V0.1) transportierte Menge als Referenz verwendet. Für die Versuche V17 und V18 wird die Erhöhung von 3,2 auf 3,7 l/s (V0.2) herangezogen. Durch beide Durchflusserhöhungen in V0 wurde die Deckschicht aufgebrochen, so dass das Verhältnis der durch die Zugabe mobilisierten Menge zur Referenzmenge größer als 1 ebenfalls auf eine zerstörte Deckschicht hindeutet.

Wiederum wird festgestellt, dass die Menge an erodiertem Sohlenmaterial mit der Zugaberate steigt, d.h. je mehr Material in einen Abschnitt eingetragen wird, desto mehr Sohlenmaterial wird erodiert (Abb. 2.41). Für die Versuche V1 und V9 wurden jeweils nur die ersten 60 min der Zugabedauer berücksichtigt (vgl. Tab. 2.2 und Tab. 2.3). Bei Verwendung der Zugabefraktion 5 - 8 mm wird bei $g_{zu} = 10 \text{ kg/m-min}$ (V6) so viel Sohlenmaterial erodiert, dass nach dem gegebenen Kriterium die Deckschicht zerstört wurde. Die Menge des erodierten Sohlenmaterials während des Langzeitversuchs V5 ist trotz der mit fortschreitender Zugabedauer abnehmenden Transportrate (siehe Abb. 2.31) so groß, dass auch hier wie in den Versuchen mit Durchflusserhöhung (V15 bis V18) die Deckschicht mengenmäßig zerstört wurde (Abb. 2.41). Bei der höchsten Zugaberate (V7) wurde jedoch deutlich weniger Sohlenmaterial erodiert.

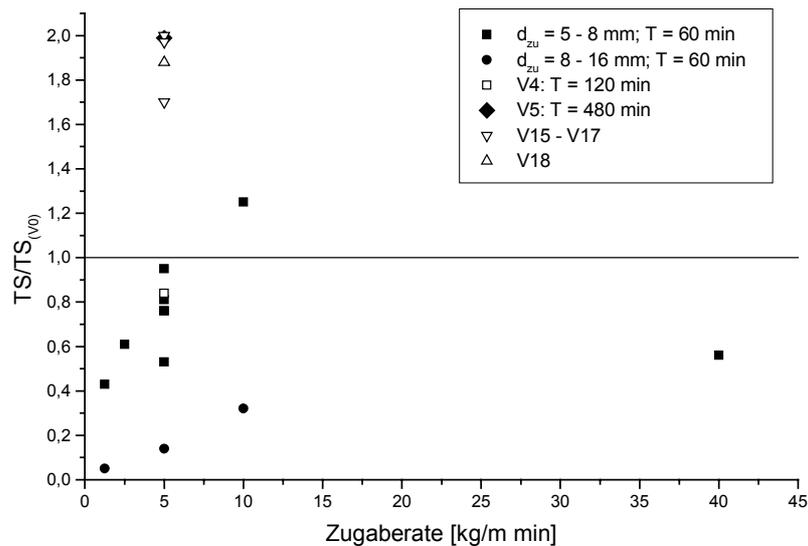


Abb. 2.41 Einfluss der Zugaberate, -dauer und der Durchflusserhöhung (V15 - V18) auf das Verhältnis des transportierten Sohlenmaterials TS zum Sohlenmaterial $TS_{(V0)}$, das durch Durchflusserhöhung ohne Zugabe transportiert wurde

Die Auftragung der während und nach der Zugabe erodierten Mengen an Sohlenmaterial in Abb. 2.42 zeigt, dass im allgemeinen während der Zugabe deutlich mehr Sohlenmaterial erodiert wurde als in der folgenden Phase der Restabilisierung. In beiden Versuchsabschnitten steigt die Menge an erodiertem Sohlenmaterial mit der Zugaberate. Eine Ausnahme stellt V7 mit einer Zugaberate von 40 kg/m·min dar. Da die Sohle augenblicklich mit Zugabematerial bedeckt war, fanden keine Umstrukturierungen der Sohle statt. Damit war die während der Zugabe erodierte Menge von Sohlenmaterial im Vergleich zu den übrigen Versuchen wesentlich geringer. Nach der Zugabe verhält sich der Versuch jedoch entsprechend den

übrigen Versuchen mit der Zugabefraktion 5 - 8 mm. Es wurde also nach der Zugabe mehr Sohlenmaterial transportiert als während der Zugabe.

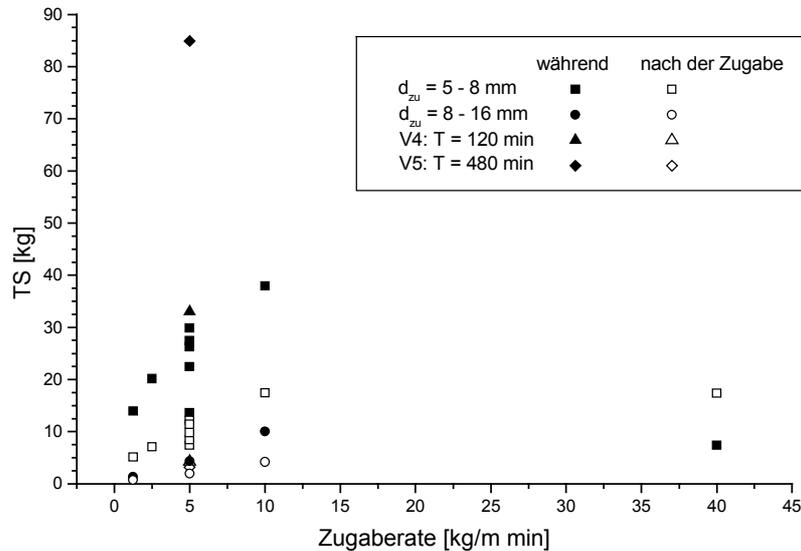


Abb. 2.42 Menge des erodierten Sohlenmaterials TS als Funktion der Zugaberate

In den Versuchen V15 und V16 war die Deckschicht bei 2,4 l/s statt bei $Q_c = 3,2 \text{ l/s}$ hergestellt worden und die Zugabe erfolgte bei Q_c . Die Deckschichten der Versuche V17 und V18 waren bei Q_c entstanden und die Zugabe erfolgte bei 3,7 l/s. Die Darstellung der während der Zugabe erodierten Mengen an Sohlenmaterial normiert mit der während der ersten 60 min erodierten Menge des Versuchs V0 bei entsprechender Durchflusserhöhung (Abb. 2.43) zeigt zunächst, dass bei der Durchflusserhöhung keine Abhängigkeit der transportierten Mengen von der Zugabefraktion mehr besteht. Weiterhin fällt auf, dass die Verhältnisse für V15 und V16 niedriger sind als für V17 und V18, obwohl die Transportraten (vgl. Abb. 2.40) und auch die erodierten Mengen mit 73,8 und 80,3 kg (V15, V16) gegenüber 48,7 und 45,1 kg (V17, V18) deutlich höher sind. Dies liegt darin begründet, dass in V0.1 bei der Durchflusserhöhung auf 3,2 l/s mehr Material transportiert worden war, als bei der Erhöhung auf 3,7 l/s, und zwar 31,2 kg im ersten Fall und 12,7 kg im letzteren. Die höhere Transportrate bzw. transportierte Menge bei geringerer Anfangsstabilität bedeutet also nicht, dass das eingetragene Geschiebe umso mehr Sohlenmaterial mobilisiert, je weniger stabil die Deckschicht ist, sofern der zum Bewegungsbeginn des Sohlenmaterials erforderliche Durchfluss überschritten wird.

Wie oben erläutert, entfällt der Unterschied in der Zugabefraktion bei gleichzeitigem Überschreiten der vorhandenen Sohlenstabilität durch die Durchflusserhöhung bei der Geschiebezugabe. Zum einen kann dies auf die Mobilisierung der Deckschicht zurückgeführt werden, zum anderen auf den kritischen Durchfluss der Zugabefraktion 8 - 16 mm (vgl. Tab. 2.5). Die Auftragung der erodierten Mengen an Sohlenmaterial als Funktion der Zugabefraktion (Abb. 2.44) zeigt wiederum, dass umso weniger Sohlenmaterial mobilisiert wird, je größer das Zugabematerial ist. Wiederum wird während der Zugabe mehr erodiert als nach der Zugabe. Hier weicht der Versuch V8, in dem Feinsand zugegeben wurde, von den übrigen Versuchen ab. Während der Zugabe ist die erodierte Menge deutlich höher als bei Verwendung größerer Fraktionen, aber mit dem Ende der Zugabe wird praktisch kein Sohlenmaterial

mehr erodiert. Auf das in der Rinne verfügbare Sohlenmaterial kann dies nicht zurückgeführt werden, da in anderen Versuchen mit hoher Erosionsmenge während der Zugabe deutlich höhere Mengen auch nach der Zugabe erodiert wurden (z.B. V6 und V15 bis V18).

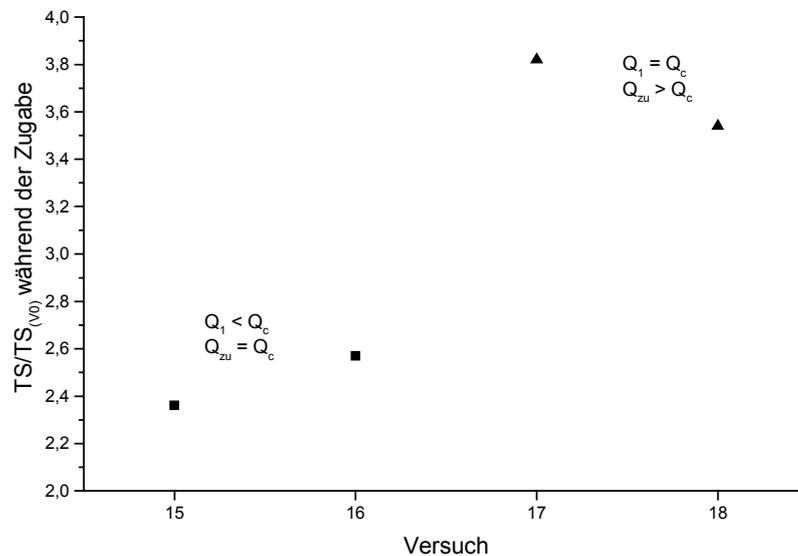


Abb. 2.43 Verhältnis der während der Zugabe erodierten Mengen an Sohlenmaterial bei gleichzeitiger Durchflusserhöhung TS zum nur durch Durchflusserhöhung erodierten Sohlenmaterial $TS_{(V0)}$

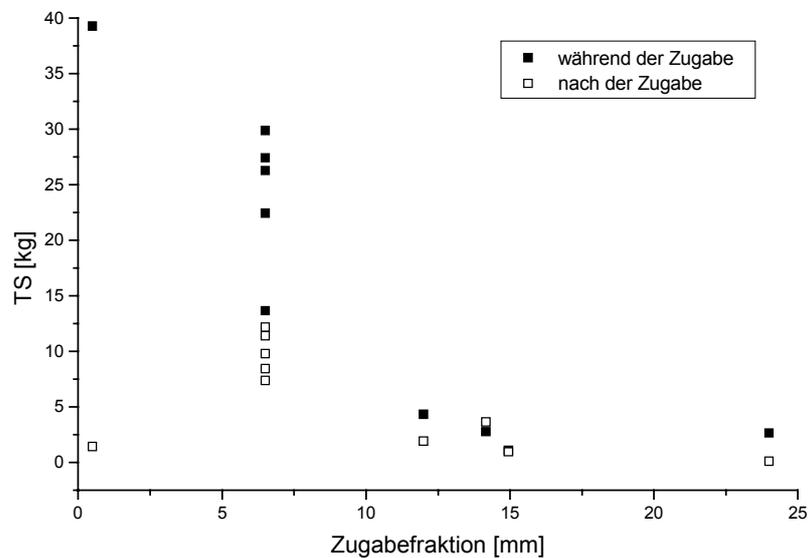


Abb. 2.44 Menge des erodierten Sohlenmaterials TS als Funktion der Zugabefraktion

Anhand der Menge des in der Sohle verbliebenen Zugabematerials kann gezeigt werden, dass kaum eine Vermischung des Sohlenmaterials mit dem Zugabematerial stattfand. In Abb. 2.45 ist die Differenz der zugegebenen Menge Z und der transportierten Menge TZ für die Versuche mit der Zugabefraktion 5 - 8 mm als Funktion von Z dargestellt. Unabhängig von der Zugaberate verbleiben zwischen 5,9 und 12,8 kg in der Sohle, wobei diese Streubreite alleine durch den wiederholten Versuch V3 abgedeckt wird. Auch die Durchflusserhöhung in V15 bewirkt trotz der höheren Transportrate des Sohlenmaterials und damit besserer

Voraussetzungen für das Einmischen des Zugabematerials nur eine geringfügig höhere Menge an eingelagertem Zugabematerial. Alleine Versuch V5, in dem über acht Stunden das eingefärbte Geschiebe mit einer Rate von 5 kg/m·min zugegeben worden war, weist mit 35 kg eine deutlich höhere Menge an in der Sohle zurückgebliebenem Zugabematerial auf. Die aufgrund der relativ geringen Zugaberate nur dünne Schicht aus Zugabematerial ermöglichte in Verbindung mit der langen Zugabedauer ein Einmischen des Zugabematerials (siehe Abb. 2.46). Hingegen war durch die hohe Zugaberate in V7 ($g_{zu} = 40 \text{ kg/m}\cdot\text{min}$) die Schicht aus Zugabematerial so dick, dass kaum ein Kontakt zwischen der bewegten obersten Schicht und der vorhandenen Deckschicht bestand.

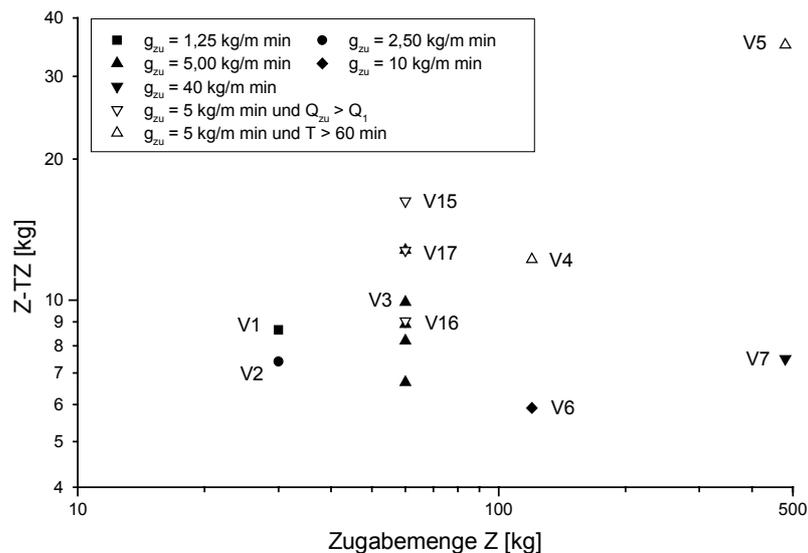


Abb. 2.45 In der Sohle verbliebenes Zugabematerial ($Z - TZ$) als Funktion der Zugabemenge Z für $d_{zu} = 5 - 8 \text{ mm}$

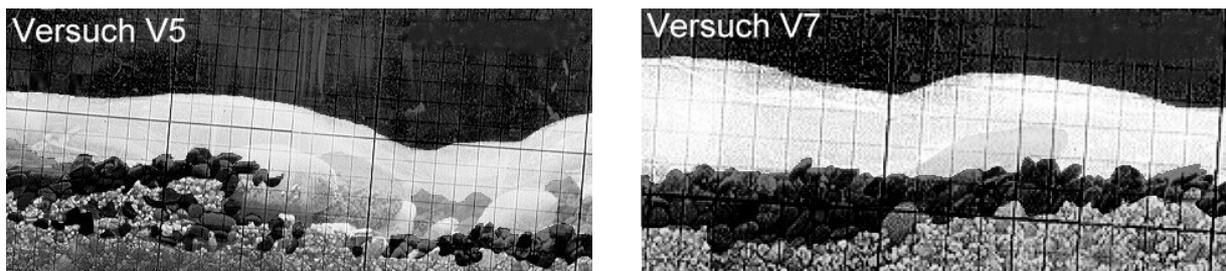


Abb. 2.46 Vergleich der Schicht aus Zugabematerial der Versuche V5 ($g_{zu} = 5 \text{ kg/m}\cdot\text{min}$, $T = 480 \text{ min}$) und V7 ($g_{zu} = 40 \text{ kg/m}\cdot\text{min}$, $T = 60 \text{ min}$) (Zugabematerial dunkel eingefärbt)

Die erodierte Menge an Sohlenmaterial alleine ist somit kein ausreichendes Kriterium, um eine zerstörte Deckschicht zu charakterisieren, wie aus dem Vergleich von V5 mit V15 deutlich wird. In V5 führte der langanhaltende Eintrag von Geschiebe zu der hohen Menge an erodiertem Sohlenmaterial, wohingegen in V15 der Sohlenwiderstand eindeutig durch den erhöhten Durchfluss und die Zugabe überschritten war. Von Bedeutung ist also auch die Kornzusammensetzung des erodierten Sohlenmaterials.

2.5.3 Kornzusammensetzung des erodierten Sohlenmaterials

In der Untersuchung der Reproduzierbarkeit der Kornzusammensetzung des erodierten Sohlenmaterials, die durch den mittleren Korndurchmesser d_{mG} charakterisiert wird, zeigte sich, dass die Streubreite zwar relativ hoch, die Tendenz der Verfeinerung des d_{mG} nach Zugabe jedoch eindeutig ist (vgl. Abb. 2.26). Diese Tendenz ist unabhängig von der Zugaberate für die Zugabefraktion 5 - 8 mm (Abb. 2.47). Während der Zugabe liegt der d_{mG} im Mittel bei 12 mm und nach der Zugabe zwischen 4 und 8 mm. Er erreicht während der Zugabe etwa den d_m der Ausgangsmischung ($d_m = 13,4$ mm), ist aber stets deutlich kleiner als derjenige der Deckschicht vor der Zugabe ($d_{mD} = 28,1$ mm). Aus dem Vergleich der Versuche in Abb. 2.47 ist eine geringfügige Vergrößerung des erodierten Sohlenmaterials mit Erhöhung der Zugaberate festzustellen. Die Verlängerung der Zugabedauer führt zu keiner signifikanten Verfeinerung des erodierten Sohlenmaterials während der Zugabe (siehe Anhang A5).

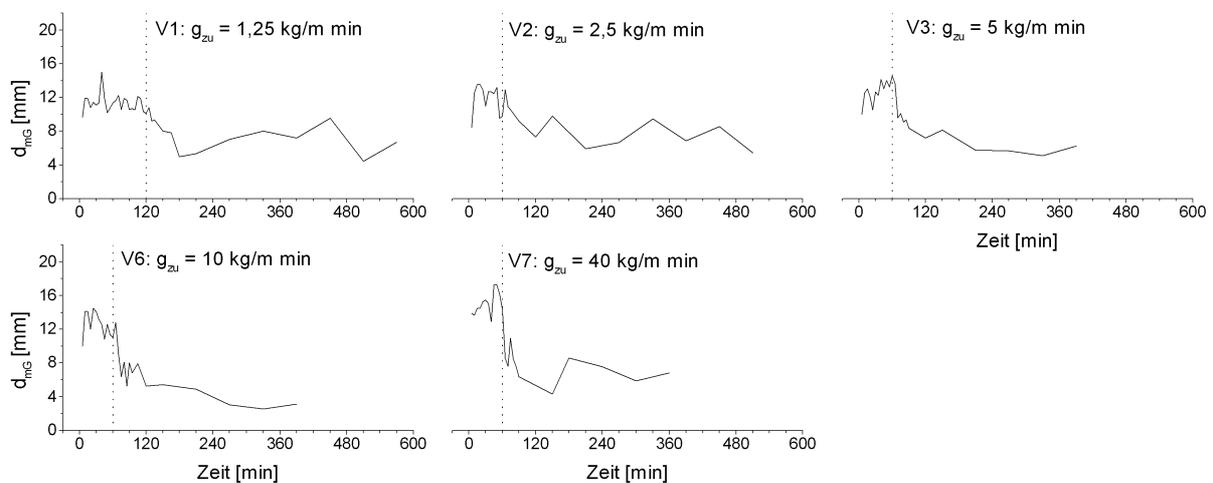


Abb. 2.47 Mittlerer Korndurchmesser d_{mG} des erodierten Sohlenmaterials als Funktion der Zugaberate für $d_{zu} = 5 - 8$ mm

Im Fall der Zugabefraktion 8 - 16 mm führt die Erhöhung der Zugaberate deutlich zu einer Vergrößerung des erodierten Sohlenmaterials (Abb. 2.48). Das Ende der Zugabe macht sich im Verlauf des d_{mG} erst bei V11 bemerkbar. Bei geringeren Zugaberaten ist kein Unterschied im erodierten Sohlenmaterial während und nach der Zugabe erkennbar.

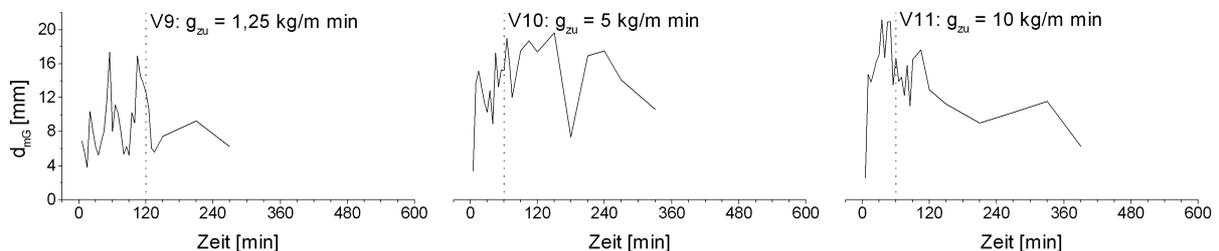


Abb. 2.48 Mittlerer Korndurchmesser d_{mG} des erodierten Sohlenmaterials als Funktion der Zugaberate für $d_{zu} = 8 - 16$ mm

Der Vergleich der mittleren Korndurchmesser des erodierten Sohlenmaterials in Abhängigkeit der Zugabefraktion in Abb. 2.49 weist zunächst eine Vergrößerung des d_{mG} mit größer werdendem Zugabematerial auf. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Transportrate des Sohlenmaterials von V1 über V3 zu V10 stark abnimmt. In den Versuchen V12 und V13, in

denen die Mengen an erodiertem Sohlenmaterial noch geringer sind, ist d_{mG} wiederum kleiner als in den Versuchen V3 und V10. Durch Zugabe der zweiten Kornmischung (V14) erreichte die Transportrate des Sohlenmaterials im Verlauf der Zugabe eine mit V10 vergleichbare Größe und auch d_{mG} liegt in der Größenordnung von V10.

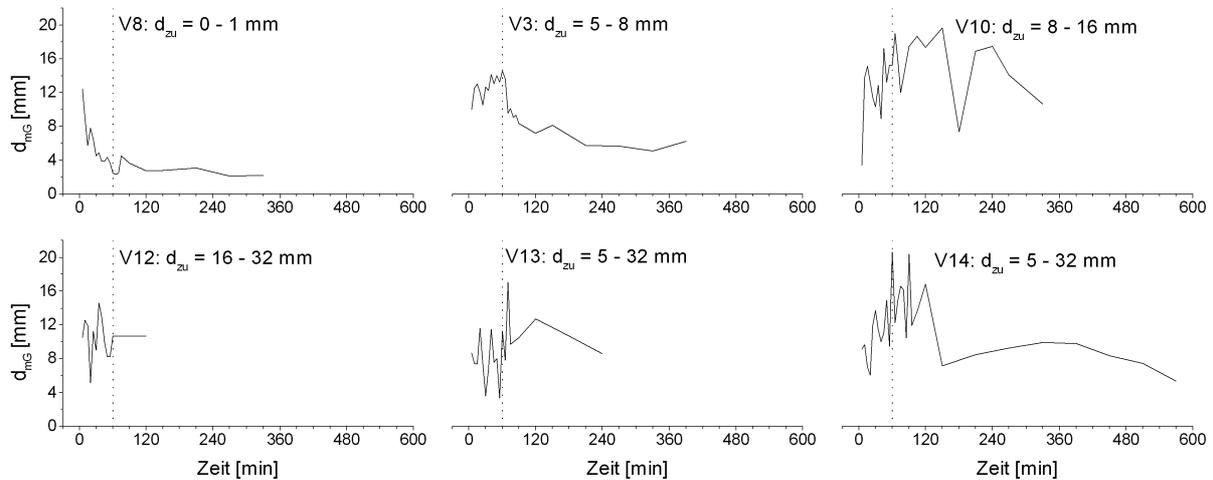


Abb. 2.49 Mittlerer Korndurchmesser d_{mG} des erodierten Sohlenmaterials als Funktion der Zugabefraktion ($g_{zu} = 5 \text{ kg/m}\cdot\text{min}$)

Obwohl ein Einfluss der Korngröße des Zugabematerials auf die Kornzusammensetzung des erodierten Sohlenmaterials erkennbar ist, wie auch die in Anhang A6 zusammengestellten Kornbänder der einzelnen Versuche zeigen, kann trotzdem kein eindeutiger funktionaler Zusammenhang abgeleitet werden. Dies ist im wesentlichen auf die geringen Transportraten der größeren Zugabefraktionen bei den untersuchten Durchflüssen zurückzuführen, wie die Darstellung des d_{mG} in Abb. 2.50 für die Versuche mit Durchflusserhöhung von $Q_c = 3,2 \text{ l/s}$ auf $3,7 \text{ l/s}$ und den Zugabefraktionen 5 - 8 mm (V17) und 8 - 16 mm (V18) zeigt. Demnach mobilisiert gröberes Zugabematerial gröbere Fraktionen der Sohle, sofern der Strömungsangriff ausreicht, um das Zugabematerial zu transportieren (siehe auch Anhang A6).

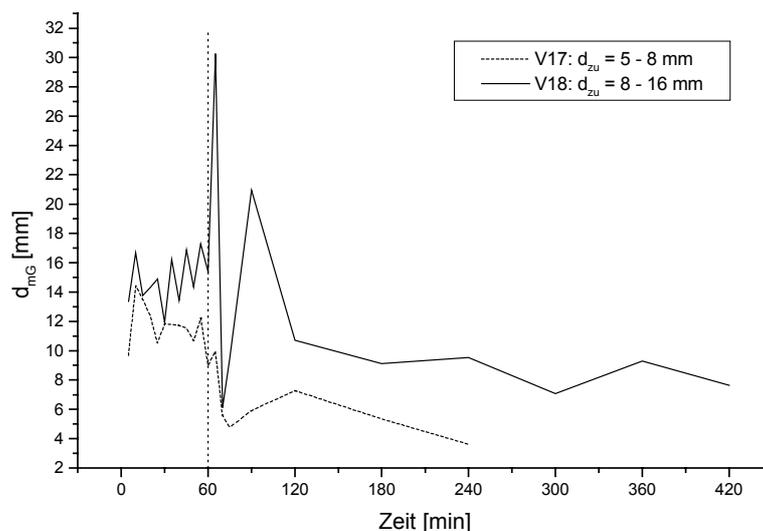


Abb. 2.50 Mittlerer Korndurchmesser d_{mG} des erodierten Sohlenmaterials als Funktion der Durchflusserhöhung von $Q_c = 3,2 \text{ l/s}$ auf $3,7 \text{ l/s}$

In Mittelgebirgsflüssen wird häufig der Vergleich der Sieblinie des Geschiebes mit der Sieblinie des Unterschichtmaterials zur Charakterisierung einer aufgebrochenen Deckschicht herangezogen. Demnach ist die Deckschicht zerstört, wenn die Kornverteilungen von Geschiebe und Unterschicht nahezu gleich sind. Für Gebirgsbäche mit ausgeprägten Sohlenstrukturen ist dieses Kriterium nicht geeignet, da bekanntlich die größten Fraktionen nur bei extremen Hochwasserereignissen transportiert werden. Die Sieblinien des erodierten Sohlenmaterials, in Abb. 2.51 beispielhaft für die Versuche V1 und V17 gegenübergestellt, verdeutlichen dies. In Anhang A7 sind die Sieblinien des erodierten Sohlenmaterials aller Versuche zusammengestellt. Trotz der großen Differenzen in den Mengen an erodiertem Sohlenmaterial (V1: TS = 19,037 kg, V17: TS = 52,692 kg) ist der Unterschied in den Sieblinien nur gering. Lediglich die größte Fraktion von 32 - 64 mm wird in V17 häufiger transportiert als in V1.

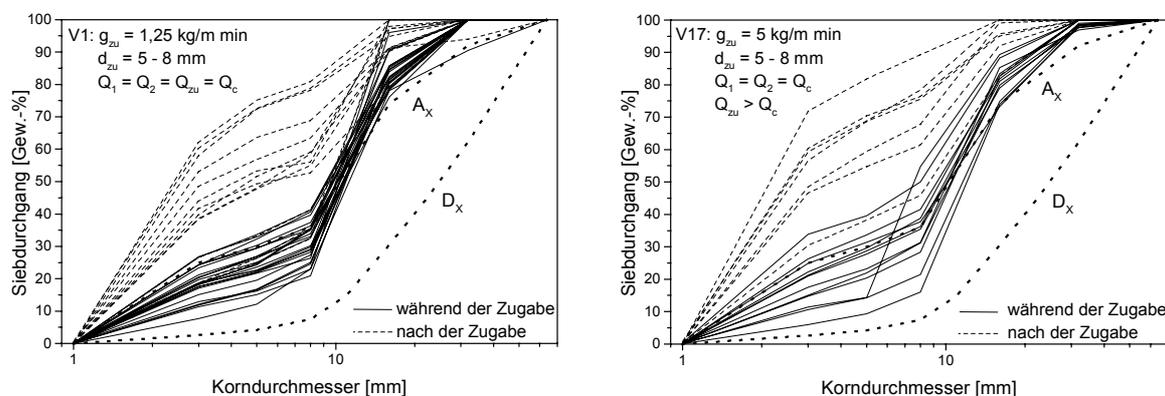


Abb. 2.51 Sieblinien des erodierten Sohlenmaterials der Versuche V1 und V17

2.5.4 Mittlere Fließgeschwindigkeit

Der Eintrag von externem Geschiebe bewirkt zum einen durch die Bewegung von Partikeln Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit. Zum anderen werden durch Ablagerung und Erosion Sohlenrauheit und -neigung verändert. Diese Änderungen konnten nicht explizit erfasst werden, da während der Zugabe der Versuch nicht unterbrochen werden konnte. In den Versuchen V5 ($g_{zu} = 5 \text{ kg/m}\cdot\text{min}$, $T = 480 \text{ min}$) und V7 ($g_{zu} = 40 \text{ kg/m}\cdot\text{min}$, $T = 60 \text{ min}$) (Tab. 2.2) wurde versucht, die Neigungsänderungen anhand von Fotos zu bestimmen, die seitlich durch die Glaswand der Rinne aufgenommen wurden. In V5 war der fotografierte Abschnitt des 2,4 m langen Messbereichs 0,5 m lang und in V7 betrug die Länge 1,0 m. Die Kontrolle der Ergebnisse anhand des Vergleichs der aus den Fotos bestimmten und der mit der Salzverdünnungsmethode gemessenen Fließgeschwindigkeit (Abb. 2.52) zeigt jedoch, dass die Auswertung der Fotos zumindest während der Zugabe keine verlässlichen Ergebnisse liefert. Auf die Auswertung der Fotos wird deshalb nicht näher eingegangen.

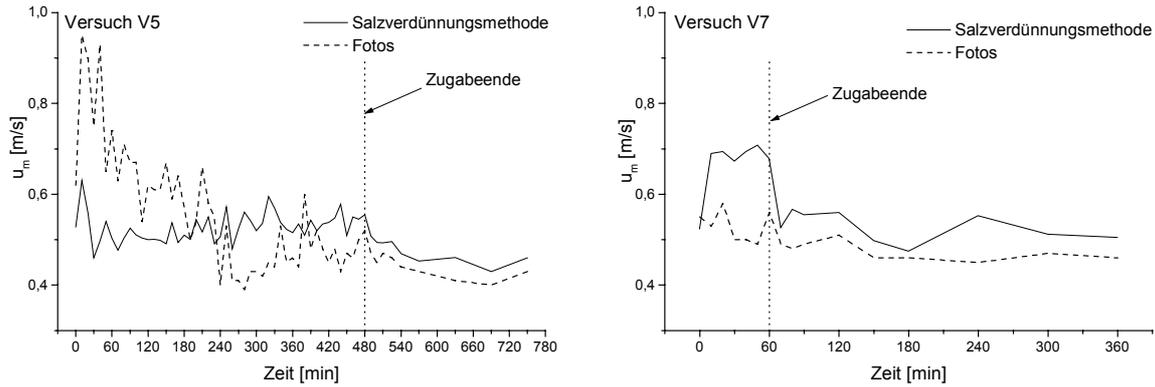


Abb. 2.52 Vergleich der mittleren Fließgeschwindigkeit gemessen mit der Salzverdünnungsmethode und bestimmt anhand von Fotos für V5 und V7

Vor Beginn der Zugabe lag die mittlere Fließgeschwindigkeit bei dem eingestellten Durchfluss von $Q_c = 3,2$ l/s über der statischen Deckschicht zwischen 0,476 und 0,571 m/s und betrug im Mittel 0,518 m/s. Wegen der recht großen Streubreite vor der Zugabe und um die Auswirkungen der Zugabe hervorzuheben, sind die während des Versuchs gemessenen Geschwindigkeiten im folgenden mit der direkt vor Zugabebeginn gemessenen Geschwindigkeit $u_{m\text{vor}}$ normiert.

Die mittlere Fließgeschwindigkeit wird im allgemeinen durch den Eintrag des externen Geschiebes erhöht. Das während der Versuche beobachtete Einlagern von Zugabematerial in vorhandene Lücken und das Auffüllen der Pools, bestätigt durch den verzögerten Anstieg der Transportraten des Zugabematerials (Kap. 2.5.1), führt zu einer Verminderung der Sohlenrauheit. Je höher die Zugaberate ist, desto dicker und ebener ist die Schicht aus Zugabematerial, desto größer ist der Unterschied der Sohlenrauheit vor und während der Zugabe und desto höher ist die Geschwindigkeit während der Zugabe (Abb. 2.53).

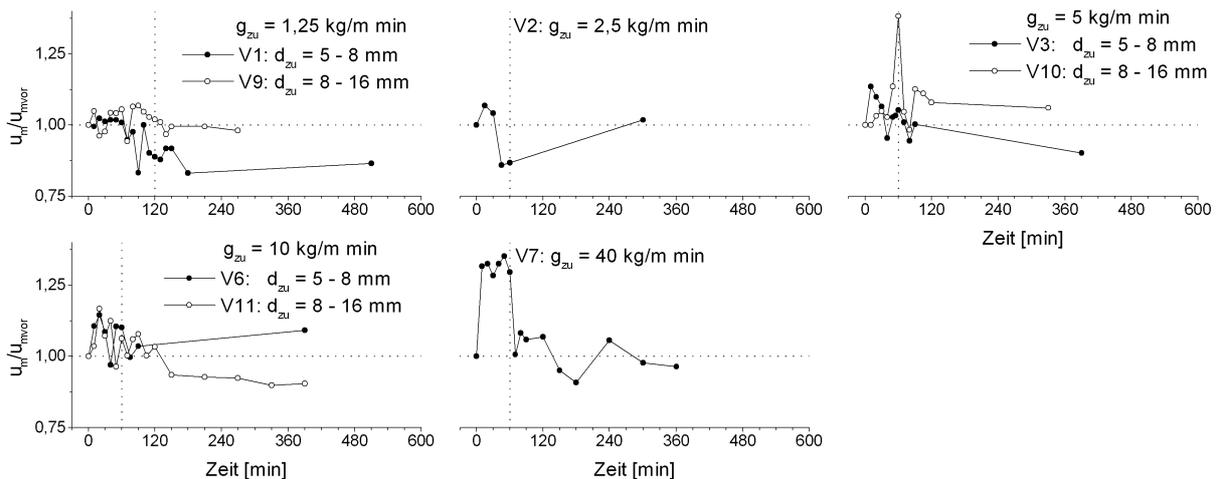


Abb. 2.53 Änderung der mittleren Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zugaberate für $d_{zu} = 5 - 8$ mm und $d_{zu} = 8 - 16$ mm

Die Gegenüberstellung der Versuche mit unterschiedlichen Zugabefraktionen in Abb. 2.54 scheint zu bestätigen, dass die Geschwindigkeit mit der Transportrate steigt. Die Versuche V10 und V12 weichen allerdings von dieser Tendenz ab. Der trotz der geringen Transportra-

ten deutliche Anstieg der Geschwindigkeit in V12 ist nicht erklärbar, da weder die Rauheit noch die Neigung der Sohle im Messbereich durch die Zugabe signifikant verändert worden war. Die Partikel der Zugabefraktion 16 - 32 mm waren nur vereinzelt in den obersten Abschnitt des Messbereichs eingetragen worden. Für das Maximum der Geschwindigkeit in V10 kann ebenfalls keine gesicherte Begründung gegeben werden. Es ist zu vermuten, dass ein Zusammenhang zwischen den Schwankungen in den Transportraten und den Schwankungen in den Geschwindigkeiten besteht. Dabei scheint in erster Linie der Transport des Zugabematerials für die Geschwindigkeitsschwankungen verantwortlich zu sein, wie anhand der in Abb. 2.55 beispielhaft dargestellten Versuche V8 und V10 ersichtlich wird. Während der Peak in der Geschwindigkeit im Fall von V10 zeitgleich mit dem Maximum in allen drei Transportraten auftritt, fällt der Peak der Geschwindigkeit in V8 mit einem relativen Minimum in der Transportrate des Sohlenmaterials, einem geringen Anstieg im Transport des Zugabematerials und keiner bemerkenswerten Gesamttransportrate zusammen.

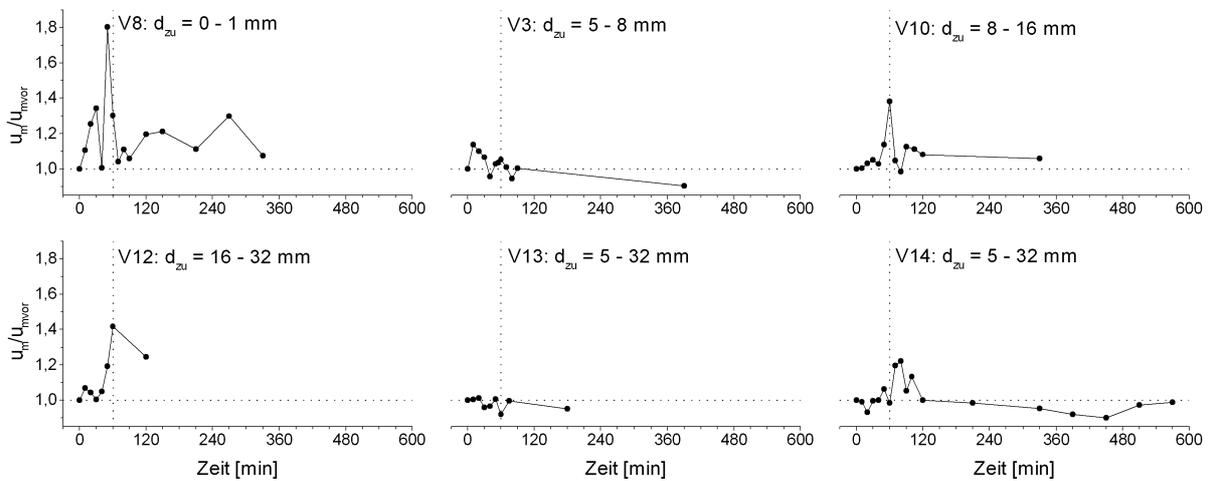


Abb. 2.54 Änderung der mittleren Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zugabefraktion

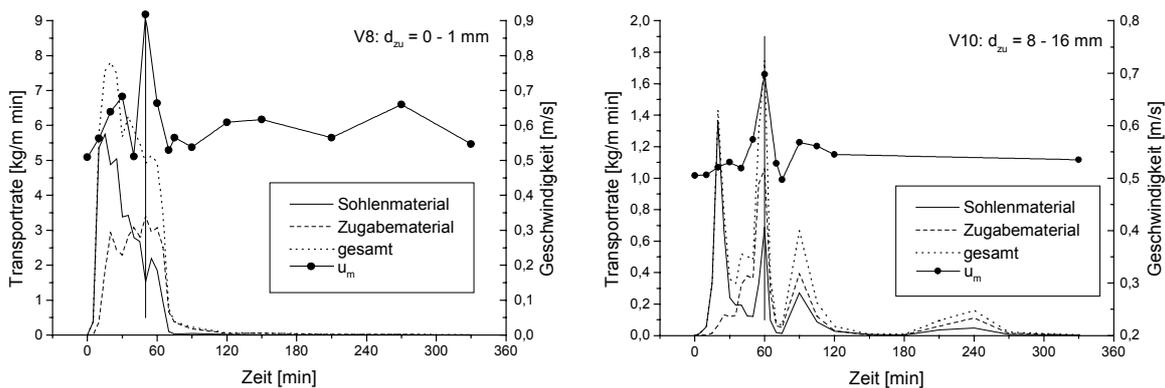


Abb. 2.55 Gegenüberstellung der Transportraten und Geschwindigkeiten der Versuche V8 und V10

Die normierten Geschwindigkeiten der Versuche mit Durchflusserhöhung sowie Geschiebezugabe sind in Abb. 2.56 dargestellt. Zur Normierung wurde die Geschwindigkeit u_{m5} bei erhöhtem Durchfluss verwendet. Bei Mobilisierung des Sohlenmaterials durch einfache Durchflusserhöhung ohne Zugabe von externem Geschiebe (V0.1) ist die Geschwindigkeit geringer als die Ausgangsgeschwindigkeit. In V0.2 nimmt die Geschwindigkeit nach 60 min zu, da

aus dem oberen Rinnenbereich so viel Material ausgetragen worden war, dass der Rinnenboden teilweise frei lag und die Sohle somit wesentlich glatter war. Wird der Durchfluss nicht erhöht, sondern nur Geschiebe zugegeben (V3 und V10) ist die Geschwindigkeit während der Zugabe höher. In den Versuchen mit Durchflusserhöhung und gleichzeitiger Geschiebezugabe ändert sich die Geschwindigkeit im Verhältnis zur Ausgangsgeschwindigkeit während der Zugabe nur unwesentlich (V17). Nach Zugabeende ist eine deutliche Abnahme aufgrund des reduzierten Durchflusses zu verzeichnen. Allerdings ist die Geschwindigkeit nach der Zugabe in V16 nur geringfügig höher als in V15, obwohl der Durchfluss bis zum Ende des Versuchs V16 konstant auf 3,2 l/s gehalten wurde (Tab. 2.4). Auch in V18 ist die Geschwindigkeit während der ersten halben Stunde kleiner oder gleich u_{m5} , steigt dann aber zusammen mit der Transportrate des Zugabematerials an (vgl. Abb. 2.39).

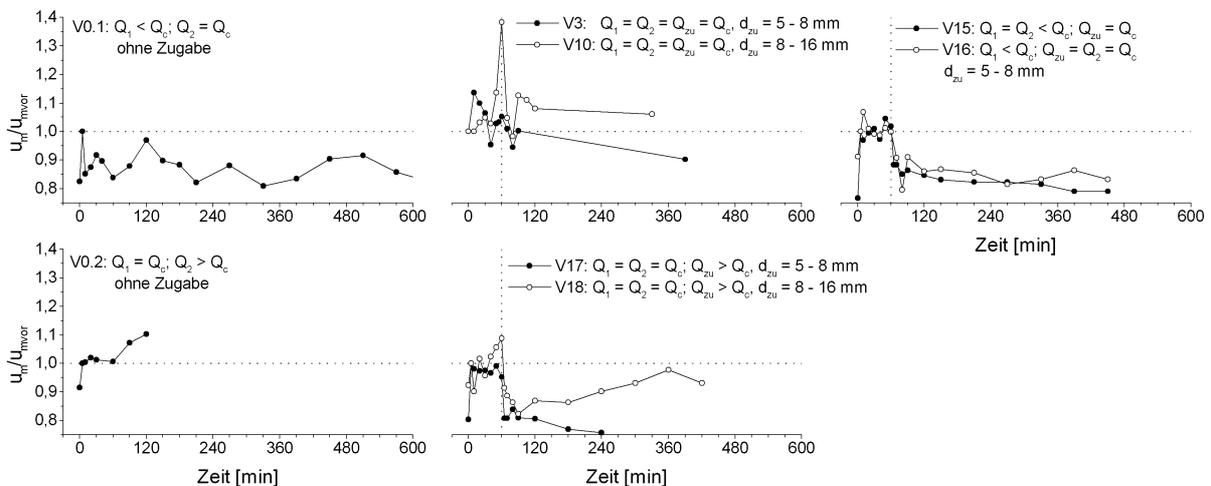


Abb. 2.56 Geschwindigkeiten bei Durchflusserhöhung und Geschiebezugabe

Wie bereits erwähnt, wird die mittlere Fließgeschwindigkeit durch die Rauheit und Neigung der Sohle sowie durch die Bewegung von Partikeln beeinflusst. Beobachtungen während der Versuche und die Analyse der Transportraten ergaben eine Verringerung der anfänglich sehr hohen Rauheit der Step-Pool-Systeme durch Auffüllen der Pools mit Zugabematerial und Einlagerungen in vorhandene Lücken der Sohle für den Fall, dass der kritische Durchfluss der vorhandenen Deckschicht nicht überschritten ist. Wie erwartet steigt die mittlere Fließgeschwindigkeit. Die Fließgeschwindigkeit kann theoretisch auch auf eine höhere Sohlenneigung zurückgeführt werden. Die Änderung der Neigung aufgrund der Geschiebezugabe war jedoch, wie oben gezeigt, nicht zufriedenstellend erfassbar. Die in Kap. 2.5.1 aufgestellte Vermutung, dass die mit abnehmender Korngröße steigende Transportgeschwindigkeit des Zugabematerials zu höheren Impulsen der Partikel führt und damit zur zusätzlichen Destabilisierung von Sohlenmaterial, scheint durch die Geschwindigkeitsmessungen bestätigt werden zu können. Demnach entzieht der Transport von groben Fraktionen, die als Einkornmaterial nicht bewegt werden würden, der Strömung Energie. Hingegen wird die Strömung durch den Transport feiner Fraktionen beschleunigt. Die Reduktion des Fließwiderstands, d.h. die Erhöhung der Fließgeschwindigkeit durch Schwebstofftransport, wurde z.B. von VANONI & NOMICOS (1959) untersucht und wird in Kap. 3.2.4.3 diskutiert. Untersuchungen zum Einfluss der Korngröße des Geschiebes auf das Strömungsfeld sind nicht bekannt.

Die kombinierte Wirkung aus einer glatteren Sohle und der Mobilität des Zugabematerials zeigt sich in den Versuchen mit $d_{zu} = 8 - 16$ mm (V9 bis V11) und V14: Das Zugabematerial wird zunächst abgelagert, wodurch die Sohle glatter wird und die Geschwindigkeit steigt. Der zum Transport des Zugabematerials erforderliche Strömungsangriff wird überschritten, die Transportraten steigen und damit nimmt die mittlere Fließgeschwindigkeit weiter zu. Zur Klärung der aufgestellten Vermutung sowie zur Beurteilung, welche Einflüsse (Änderung der Neigung, Änderung der Rauheit, Bewegung von Partikeln) maßgebend oder auch vernachlässigbar ist, ist die Erweiterung der Kenntnisse zum Strömungsfeld über rauhen und bewegten Sohlen erforderlich.

Im folgenden Abschnitt wird analysiert inwieweit sich die Ereignisse während der Geschiebezugabe in charakteristischen Parametern der statischen Deckschichten niederschlagen.

2.5.5 Änderung der Parameter der statischen Deckschichten

Die Verhältnisse der Geschwindigkeit u_m , der Sohlenneigung I_s , des mittleren Korndurchmessers der Deckschicht d_{mD} und der Standardabweichung der Sohlenerhebungen s der statischen Deckschichten jeweils vor und nach der Zugabe sind in Abb. 2.57 und Abb. 2.58 dargestellt. Die Unterschiede sind so gering und die Streubreite in dem wiederholten Versuch V3 ist so groß (siehe auch Kap. 2.4.4), dass aus den über statischen Sohlen erhobenen Parametern nicht auf die Ereignisse, die während der Zugabe statt fanden, geschlossen werden kann. Systematische Veränderungen aufgrund der Zugaberate oder der Zugabefraktion sind nicht erkennbar.

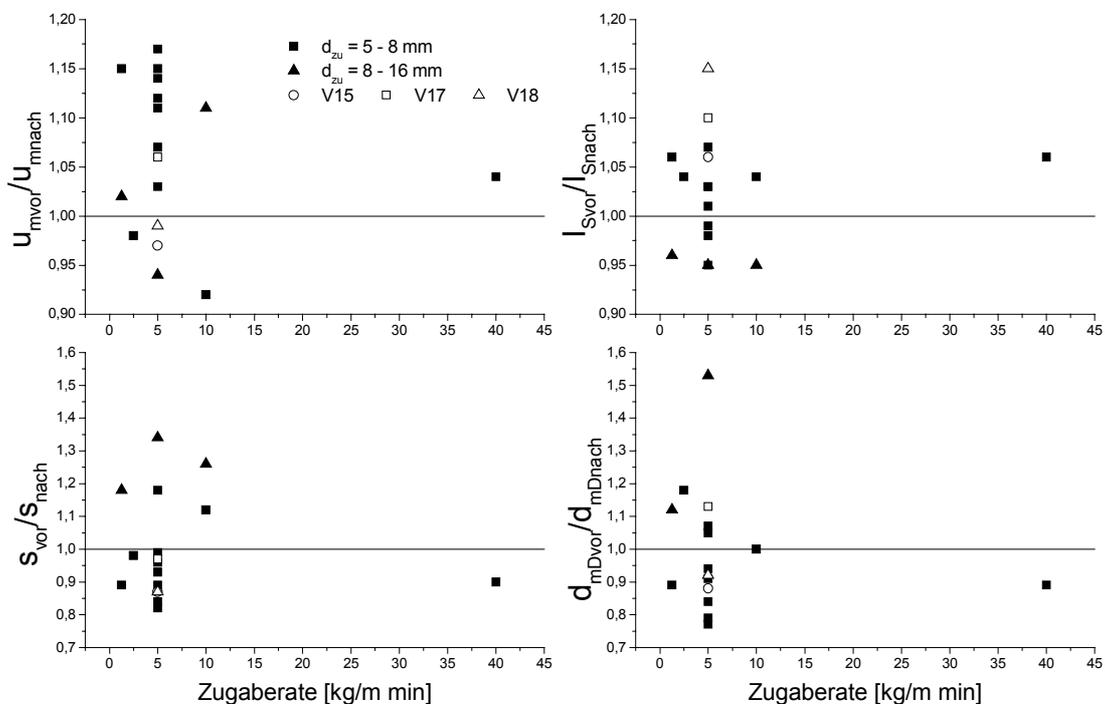


Abb. 2.57 Änderung der Parameter der statischen Sohle in Abhängigkeit der Zugaberate

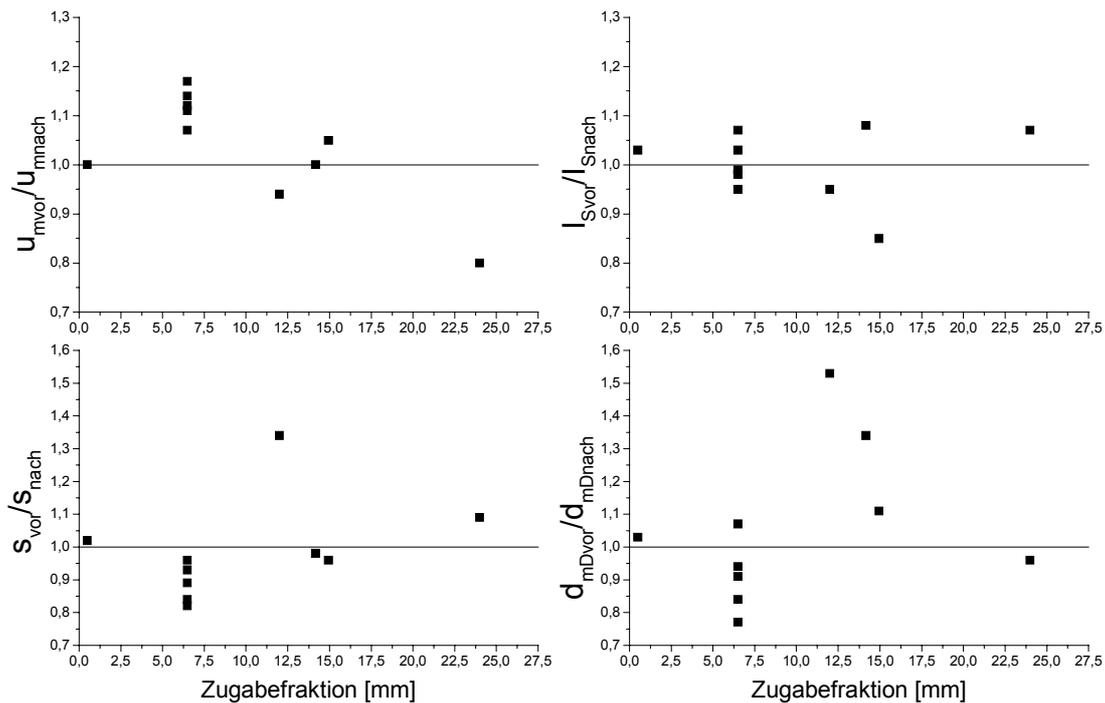


Abb. 2.58 Änderung der Parameter der statischen Sohle in Abhängigkeit der Zugabefraktion

2.5.6 Geschiebetransportberechnung

In Kap. 2.2 wurden Ansätze zur Berechnung der Geschiebetransportraten für Kiesflüsse aufbereitet, deren Anwendbarkeit im folgenden diskutiert wird.

Zunächst werden die zu erwartenden Transportraten für die Deckschichten vor der Zugabe berechnet. Zur Bestimmung der in den Formeln erforderlichen Parameter werden alle Versuche gemittelt, deren statische Deckschicht bei $Q = 2,4$ l/s hergestellt wurde (V0.1, V15, V16), und ebenso alle Versuche, die mit einer bei $Q = 3,2$ l/s hergestellten Deckschicht begannen (V0.2, V1-V14, V17, V18). Die zur Anwendung der Formeln erforderlichen Parameter und die berechneten Transportraten sind in Tab. 2.6 zusammengestellt. Die gemessene Transportrate war jeweils kleiner als die Referenztransportrate von $0,017$ kg/m \cdot min, die in den vorliegenden Untersuchungen vernachlässigbaren Geschiebetransport kennzeichnet.

Tab. 2.6 Parameter und Geschiebetransportraten der gemittelten Versuche vor der Zugabe

Q [l/s]	u_m [m/s]	I_s [%]	d_{30} [mm]	d_{90} [mm]	d_m [mm]	Hunziker	Parker	MPM [kg/m \cdot min]	SJ	Rick.	Palt
2,4	0,48	8,81	15,5	54,0	27,8	-	3,86	-	4,33	-188,1	0,001
3,2	0,52	8,82	15,8	53,2	28,1	-	10,74	-	29,15	-159,1	0,001

Die Berechnung der Geschiebetransportraten nach der von HUNZIKER (1995) (Gl. 2.23) modifizierten Formel von MEYER-PETER & MÜLLER (1949) [MPM] liefert ebenso wie die ursprüngliche Formel (Gl. 2.18) kein Ergebnis, da die auf den mittleren Korndurchmesser bezogene

dimensionslose Sohlenschubspannung kleiner als der kritische Shields-Parameter ist. Aufgrund der negativen Differenz sind die Gleichungen nicht definiert. Nach PARKER (1990) (Gl. 2.24) beträgt die Transportrate 3,86 resp. 10,74 kg/m·min, wobei nach Abb. 2.19 für $\sigma_{\phi_0} = 1,11$ und 1,2 und für $\omega_0 = 0,83$ und 0,77 ermittelt wurde. Werden diese beiden zur Berücksichtigung der Häufigkeitsverteilung der Geschiebesieblinie eingeführten Parameter vernachlässigt, d.h. gleich 1 gesetzt, sind die für die Deckschichten berechneten Transportraten mit 13,86 resp. 33,49 kg/m·min sogar noch höher. Die tatsächliche Transportrate von weniger als 0,017 kg/m·min wird also bei weitem überschätzt. Die von SMART & JÄGGI (1983) [SJ] weiterentwickelte Meyer-Peter-Müller Gleichung (Gl. 2.19) liefert ebenfalls deutlich zu hohe Transportraten, wohingegen die Ergebnisse nach dem Ansatz von RICKENMANN (1990) (Gl. 2.20) [Rick.] sogar negativ sind, d.h. Material würde abgelagert werden, wenn die Sohle in Bewegung wäre. Nach PALT (2001) (Gl. 2.21) werden im Fall der abgeplatteten Sohle 0,001 kg/m·min transportiert, was dem praktisch nicht vorhandenen Transport am nächsten kommt.

Zur Berechnung der Transportraten während der Zugabe werden die vor der Zugabe bestimmten Werte für u_m und I_S verwendet. Der Durchfluss war, wie erwähnt, während der Zugabe konstant. Die Zugabematerialien liefern die charakteristischen Korndurchmesser d_{30} , d_{90} und d_m . Die Gleichungen bieten keine Möglichkeit, Sohlen- und Geschiebematerial getrennt zu betrachten. Lediglich in den Ansätzen von MEYER-PETER & MÜLLER (1949) und PALT (2001) kann zumindest die Rauheit der vorhandenen Sohle berücksichtigt werden, indem der Faktor (k_{Sf}/k_r) auf die Deckschicht vor der Zugabe bezogen wird anstatt auf das transportierte Material. Die so modifizierten Ansätze tragen den Zusatz „D_X“. In Tab. 2.7 sind die berechneten Transportraten zusammen mit den gemessenen, über die Zugabedauer gemittelten Raten aufgeführt. Eine Unterscheidung in Sohlen- und Zugabematerial wird hier nicht vorgenommen. Die Charakteristika der einzelnen Versuche sind in den Tabn. 2.2 - 2.4 (Kap. 2.4.3) zusammengestellt. Der Ansatz von PARKER (1990) gilt ausdrücklich nur für Geschiebe, das im betrachteten Abschnitt durch Überschreiten des Strömungsangriffs aus der Sohle mobilisiert wird (BAKKE ET AL., 1999). Auch der Ansatz von HUNZIKER (1995) ist außerhalb eines numerischen Modells im Fall der Mobilisierung der Sohle durch Geschiebeeintrag nicht zur Berechnung des Geschiebetransports geeignet. Diese beiden Ansätze können deshalb im folgenden nicht berücksichtigt werden.

Die ursprüngliche Formel von MEYER-PETER & MÜLLER (1949) liefert mit Ausnahme von Versuch V8, in dem Sand ($d_{zu} = 0 - 1$ mm) zugegeben worden war, keine Ergebnisse, da dem Ansatz zufolge die zur Bewegung erforderliche Sohlenschubspannung nicht überschritten ist. Das Ergebnis für V3.4 (Tab. 2.7) zeigt jedoch, dass der zum Bewegungsbeginn erforderliche Strömungsangriff nur knapp unterschritten ist. Wird die Formel so modifiziert, dass die Rauheit auf die Deckschicht vor der Zugabe bezogen wird, stimmen die Ergebnisse für die Versuche mit der Zugabefraktion 5 - 8 mm und einer Zugaberate von 5 kg/m·min (V3 bis V5 und V15 bis V17) recht gut mit den Messungen überein. Die Berechnungen weichen nur noch um den Faktor 0,5 - 2,4 von den Messungen ab, wobei diese Streubreite schon durch die reproduzierten Versuche (V3.1 - V3.5) gegeben ist. Damit kann sie nicht auf die Zugabedauer oder die Durchflusserhöhung während der Zugabe zurückgeführt werden. Die Transportraten der Versuche mit geringeren Zugaberaten (V1 und V2) werden überschätzt, die mit höheren Zugaberaten (V6 und V7) unterschätzt. In den Versuchen mit größerem Zugabematerial (V9

- V14 und V18) wird wiederum der zum Bewegungsbeginn erforderliche Strömungsangriff nicht erreicht, so dass die Gleichung nicht definiert ist. Die Transportrate des Versuchs V8 ($d_{zu} = 0 - 1 \text{ mm}$) wird um den Faktor 9 überschätzt.

Die Ansätze von SMART & JÄGGI (1983) und RICKENMANN (1990) liefern deutlich zu hohe Transportraten, der Ansatz von PALT (2001) unterschätzt die gemessenen Transportraten bei weitem. Die Verwendung der Rauheit der Deckschicht vor der Zugabe im Ansatz von PALT (2001) erhöht zwar die berechneten Transportraten, vor allem bei V8, verbessert jedoch nicht die Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung.

Tab. 2.7 Gemessene und nach MEYER-PETER & MÜLLER (MPM), SMART & JÄGGI (SJ), RICKENMANN (Rick.) und PALT berechnete Transportraten [kg/m²·min]

Versuch	g_B gemessen	MPM (Gl. 2.18)	MPM-D _x (Gl. 2.18)	SJ (Gl. 2.19)	Rick. (Gl. 2.20)	Palt (Gl. 2.21)	Palt-D _x (Gl. 2.21)
V1	1,84	-	5,23	85,33	68,14	0,007	0,172
V2	3,06	-	17,50	117,96	99,47	0,002	0,705
V3.1	5,51	-	8,33	108,90	93,69	0,016	0,271
V3.2	5,73	-	7,98	104,06	87,95	0,013	0,259
V3.3	5,80	-	4,48	88,90	73,03	0,014	0,151
V3.4	4,77	0,03	5,81	102,99	89,12	0,024	0,189
V3.5	5,09	-	12,20	118,95	104,05	0,008	0,427
V4	5,39	-	5,83	91,97	75,45	0,010	0,190
V5	5,40	-	2,94	75,83	58,99	0,009	0,111
V6	11,42	-	2,27	76,94	61,27	0,015	0,095
V7	38,09	-	9,24	103,79	86,82	0,008	0,305
V8	5,61	5,10	50,32	121,67	108,49	0,450	109,60
V9	0,16	-	-	88,27	49,77	0,001	0,041
V10	0,66	-	-	80,38	42,61	0,001	0,032
V11	6,73	-	-	65,18	33,56	0,007	0,012
V12	0,25	-	-	26,85	-78,85	0,001	0,001
V13	0,11	-	-	65,87	8,50	0,005	0,007
V14	0,38	-	-	76,58	21,48	0,008	0,009
V15	9,54	-	8,43	98,78	82,74	0,014	0,299
V16	10,18	-	7,84	94,98	78,37	0,013	0,198
V17	7,48	-	17,14	127,68	111,70	0,005	0,684
V18	5,95	-	-	107,11	77,60	0,018	0,033

Die Berechnungsergebnisse größer Null, d.h. die Transportrate von V12 nach RICKENMANN (1990) ist nicht enthalten, sind als Funktion der gemessenen Transportraten in Abb. 2.59 dargestellt. Wie gesagt bezeichnet der Zusatz „D_x“ die Ansätze, in denen der Parameter k_{St}/k_r auf die Rauheit der Sohle vor der Zugabe bezogen ist.

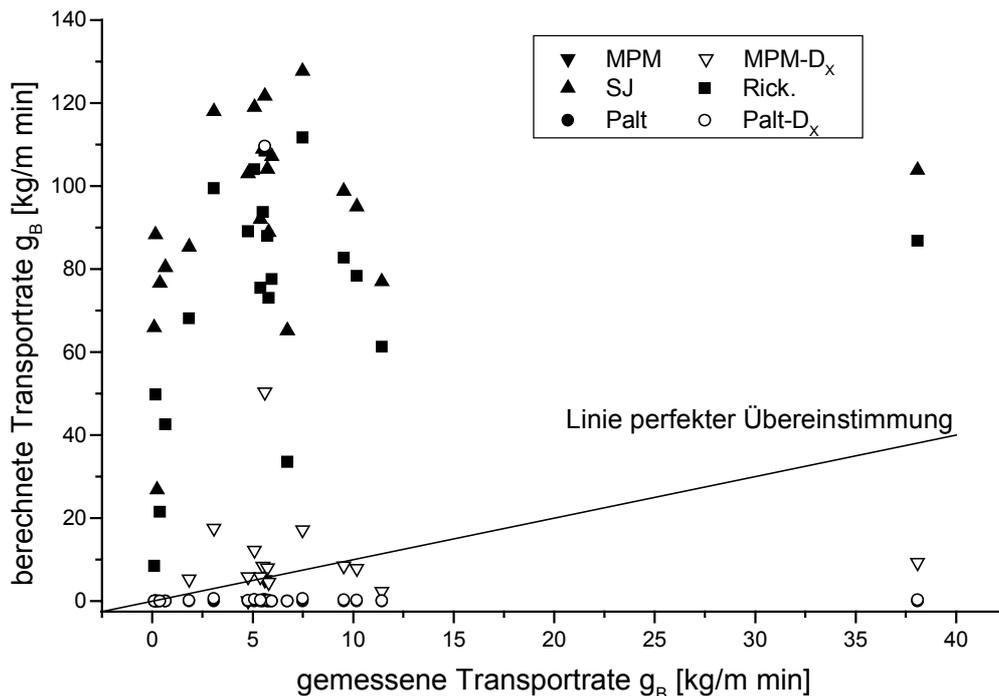


Abb. 2.59 Gemessene und nach MEYER-PETER & MÜLLER (MPM), SMART & JÄGGI (SJ), RICKENMANN (Rick.) und PALT berechnete Transportraten

Die großen Differenzen zwischen Messung und Berechnung können zum Teil damit begründet werden, dass Änderungen der Sohlenneigung durch Ablagerung und Erosion hier nicht berücksichtigt sind. Weiterhin spielt das Vorhandensein eines mobilen Gleichgewichts eine Rolle, wie anhand verschiedener Phasen des Langzeitversuchs V5 ($T = 480$ min) und des Versuchs V7, in dem die Zugaberate 40 kg/m-min betrug, erläutert wird. In Abb. 2.60 sind die Verhältnisse der nach SMART & JÄGGI (1983) und RICKENMANN (1990) berechneten und der gemessenen Transportraten dargestellt. Die Formel von MEYER-PETER & MÜLLER (1949) liefert wieder nur zum Teil Ergebnisse und der Ansatz von PALT (2001) deutlich zu niedrige, weshalb diese Ansätze nicht enthalten sind.

V5 ist in sechs Zeiträume aufgeteilt, über die die zur Anwendung der Formeln erforderlichen Parameter gemittelt wurden. Die Wassertiefe wurde hierfür aus den mit der Salzverdünnungsmethode gemessenen Geschwindigkeiten berechnet. Die Sohlenneigungen wurden anhand der durch die Seitenwand der Rinne aufgenommenen Fotos bestimmt, auch wenn diese Werte, wie in Kap. 2.5.4 gezeigt wurde, nicht zuverlässig sind. Mit dem ersten Zeitraum (min 0 - 60) werden die anfänglich sehr hohen Umlagerungen der Deckschicht und die Anpassung des Systems an die veränderten Randbedingungen erfasst. Der zweite Zeitraum (min 0 - 270) beinhaltet die Zeit vom Zugabebeginn bis zum erreichten Geschiebegleichgewicht. Der dritte Zeitraum erstreckt sich über die gesamte Zugabedauer von min 0 - 480. Die folgenden drei Zeiträume umfassen Phasen, in denen das Gleichgewicht erreicht war. Aufgrund der hohen Zugaberate war das Geschiebegleichgewicht in V7 bereits nach fünf Minuten erreicht, weshalb nur ein Zeitabschnitt betrachtet wird. Auch hier wird die aus den Fotos bestimmte Sohlenneigung verwendet. Die Parameter von V7 sowie der einzelnen Zeitabschnitte von V5 sind in Tab. 2.8 zusammengestellt.

Tab. 2.8 Gemessene und berechnete Transportraten der Versuche V5 und V7

	Zeitraum [min]	u_m [m/s]	I_s [%]	Messung [kg/m·min]	MPM-D _x	[kg/m·min]			
						SJ	Rick.	Palt	Palt-D _x
V5.1	0 - 60	0,531	9,08	5,94	7,23	99,95	84,34	0,010	0,234
V5.2	0 - 270	0,516	8,68	5,52	6,64	92,69	75,88	0,007	0,214
V5.3	0 - 480	0,527	7,30	5,40	1,51	66,52	49,78	0,009	0,078
V5.4	270 - 330	0,550	5,47	5,02	-	36,58	23,14	0,015	0,014
V5.5	270 - 480	0,540	4,97	5,19	-	30,13	17,56	0,013	0,009
V5.6	330 - 480	0,538	4,51	5,24	-	24,29	12,92	0,012	0,006
V7	5 - 60	0,690	8,91	38,09	1,26	96,24	86,82	0,227	0,072

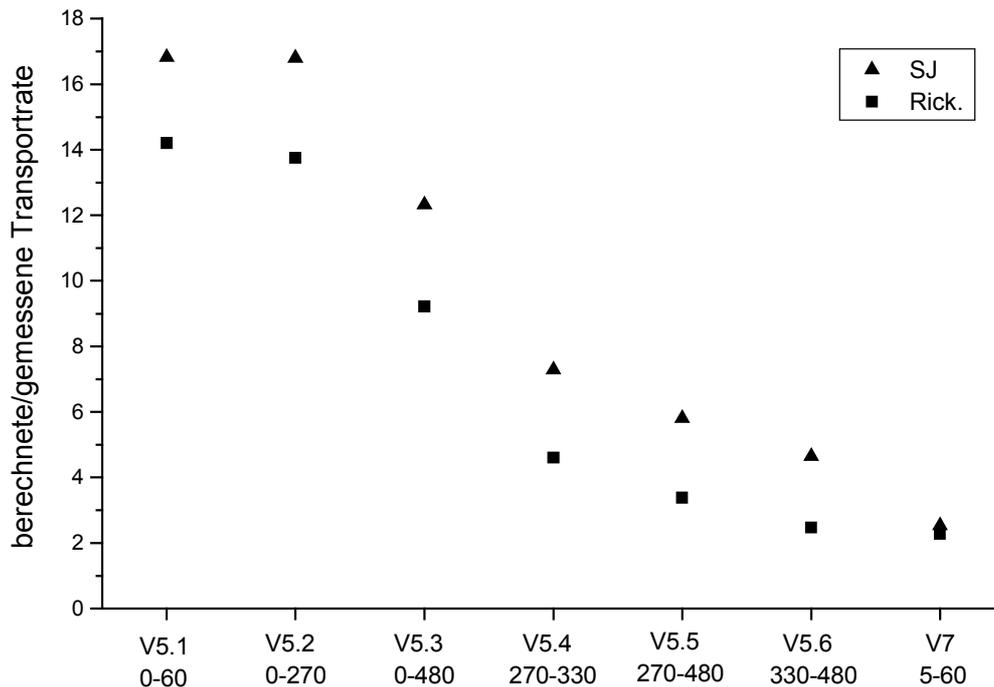


Abb. 2.60 Verhältnis der berechneten zu den gemessenen Transportraten in unterschiedlichen Zeitabschnitten des Versuchs V5 sowie des Versuchs V7

Für die Zeiträume 1 und 2 des Versuchs V5 werden die gemessenen Transportraten etwa um den Faktor 14 - 17 überschätzt. Die Abweichungen zwischen Messung und Berechnung werden geringer, wenn über die gesamte Zugabedauer gemittelt wird. Bei erreichtem Gleichgewicht (V5.4 - V5.6 und V7) wird der Transport noch um den Faktor 2,5 - 7 überschätzt. Die Abnahme der berechneten Transportraten ist in erster Linie auf die Abnahme der Sohlenneigung zurückzuführen, die leider nicht zufriedenstellend messbar war.

Die Berechnung der Geschiebetransportraten mit verschiedenen für Kiesflüsse entwickelten Ansätzen zeigt allgemein keine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Zu einem gewissen Teil ist dies auf die hier nicht berücksichtigte Änderung der Sohlenneigung durch Ablagerung und Erosion zurückzuführen. Weiterhin beeinflusst die sich im Verlauf eines Versuchs ändernde Rauheit der Sohle die Transportvorgänge, wie in den vorangehenden Abschnitten gezeigt werden konnte. Die verwendeten Ansätze bieten keine Möglichkeit, Rauheitsänderungen zu berücksichtigen. Das unterschiedliche Maß der Beeinflussung der

Geschwindigkeit durch Geschiebetransport, Rauheits- und Neigungsänderung müsste in einem gesonderten Programm untersucht werden. Ein weiterer Grund der geringen Übereinstimmungen wird in dem Versuchsaufbau zur Entwicklung der auf Labordaten basierenden Ansätze vermutet. Die Daten von MEYER-PETER & MÜLLER (1949), SMART & JÄGGI (1983) und RICKENMANN (1990) sowie Grundlagen des Ansatzes von PARKER (1990) wurden in Rezirkulationsversuchen gewonnen. Die Sohlenneigung, die Kornzusammensetzung des Geschiebes, die Sohlenrauheit und damit die Wassertiefe und die Geschwindigkeit hatten sich also an den vorgegebenen Durchfluss anpassen können, bevor die Daten erhoben worden waren. Die Entwicklung von einer statischen hin zu einer mobilen Deckschicht kann anhand der Formeln nicht erfasst werden.

2.6 Zusammenführende Diskussion der Ergebnisse

Die aus den in Kap. 2.4 vorgestellten Untersuchungen gewonnenen Informationen, die in Kap. 2.5 aufbereitet sind, werden im folgenden zusammenfassend diskutiert, so dass ein Gesamtbild zur gegenseitigen Beeinflussung einer statischen Deckschicht und des Transports von externem Geschiebe entsteht.

Vor der Zugabe von eingefärbtem Kies als externes Geschiebe wurde durch Selbststabilisierung des Sohlenmaterials zunächst eine statische Deckschicht hergestellt. Aufgrund des gewählten Sohlenmaterials und der Neigung der Versuchsrinne von 9,7 % wies die Sohle neben der Deckschicht ausgeprägte Step-Pool Strukturen auf. Der zur Herstellung der Deckschicht eingestellte Durchfluss lag auch während der Zugabe vor, so dass die Reaktion der Sohle einzig auf den Eintrag des externen Geschiebes zurückzuführen ist. Als Versuchsparameter wurden die Zugaberate, -dauer und -fraktion variiert. In weiteren Versuchen wurde die Auswirkung des Geschiebeeintrags bei gleichzeitigem Überschreiten des zum Bewegungsbeginn der Deckschicht führenden Durchflusses untersucht. Die Ausgangssituation stellte hier zum einen die maximal stabile Deckschicht und zum anderen eine weniger stabile Deckschicht dar, die bei einem geringeren als dem kritischen Durchfluss Q_c hergestellt worden war.

Generell wurde festgestellt, dass trotz maximaler Stabilität der Deckschicht durch den Eintrag von externem Geschiebe stets Sohlenmaterial mobilisiert wird. Die Transportvorgänge sind dabei im wesentlichen vom Verhältnis des kritischen Durchflusses des Zugabematerials zum herrschenden Durchfluss abhängig. Bezüglich der Stabilität der vorhandenen Deckschicht und der Mobilität des externen Geschiebes können sechs Fälle unterschieden werden, die in Tab. 2.9 aufbereitet sind und im folgenden beschrieben werden.

Tab. 2.9 Auswirkungen des Eintrags von externem Geschiebe (kritischer Durchfluss = Q_{cG}) auf eine statische Deckschicht (kritischer Durchfluss = Q_{cD}) (g_{BS} = Transportrate des Sohlenmaterials, TS = transportierte Menge des Sohlenmaterials)

Ablagerung des externen Geschiebes	am Beginn des Abschnitts	Fall 1: $Q \ll Q_{cG}$ (V12 - 14)	Mobilisierung von Sohlenmaterial durch	g_{BS} im Verhältnis zur reinen Durchflusserhöhung	TS im Verhältnis zur reinen Durchflusserhöhung
	über den ganzen Abschnitt	Fall 2: $Q \leq Q_{cG}$ (V9 - 11)	<ul style="list-style-type: none"> - lokal begrenzte Strömungsänderung - lokal begrenzte Strömungsänderung - Änderung der Rauheit und der Neigung 	deutlich geringer	geringer (Schutz durch Schicht aus externem Geschiebe)
über den ganzen Abschnitt	über den ganzen Abschnitt	Fall 3: $Q > Q_{cG}$ (V1 - 8)	<ul style="list-style-type: none"> - Impulse der bewegten Körner - Änderung der Rauheit und der Neigung 	geringer	geringer (schnellere Restabilisierung)
	über den ganzen Abschnitt	Fall 4: $Q \ll Q_{cG}$ (V12 - 14)	<ul style="list-style-type: none"> - Überschreitung von Q_{cD} - Änderung der Rauheit und der Neigung 	gleich hoch	geringer (schnellere Restabilisierung)
kaum Ablagerung	kaum Ablagerung	Fall 5: $Q \leq Q_{cG}$ (V18)	<ul style="list-style-type: none"> - Impulse der bewegten Körner - Überschreitung von Q_{cD} - Änderung der Rauheit und der Neigung 	deutlich höher	deutlich höher
		Fall 6: $Q > Q_{cG}$ (V15 - 17)	<ul style="list-style-type: none"> - Impulse der bewegten Körner - Überschreitung von Q_{cD} - Änderung der Rauheit und der Neigung 	deutlich höher	deutlich höher

$Q \leq Q_{cD}$

$Q > Q_{cD}$

Solange weder der zum Bewegungsbeginn führende Strömungsangriff der vorhandenen Deckschicht noch der kritische Durchfluss des Zugabematerials überschritten wird, der mit der Gleichung von ABERLE (2000) (Gl. 2.15a) unter Verwendung des d_m abgeschätzt wurde (siehe Tab. 2.5), bleibt das in den stabilen Abschnitt eingetragene Material am Zugabeort liegen (Fall 1). Nur vereinzelt werden zugegebene Körner weitertransportiert. Dort wo sie abgelagert werden, wird das Strömungsfeld verändert, wodurch Sohlenmaterial aus der Deckschicht gelöst wird. Die Änderungen des Strömungsfeldes durch einzelne Körner und auch durch die am Einlauf entstandene Rampe aus Zugabematerial wirken sich nur lokal begrenzt aus. Die Erhöhung des Durchflusses nach der Zugabe bewirkt im Fall 1 jeweils einen kurzfristigen Anstieg der Transportrate des Sohlenmaterials, wodurch das Zugabematerial mitgenommen und über die Sohle verteilt wird (siehe auch Fall 4). Die Stabilität der Sohle wird also insofern erhöht, als sie vom Zugabematerial, das einen höheren kritischen Durchfluss aufweist, zugedeckt wird. Eine Vermischung der beiden Materialien findet nicht statt. Die neue Sohlenoberfläche erreicht nicht die Stabilität des Zugabematerials, da, wie bereits erwähnt, bei jeder Durchflusserhöhung vorwiegend die feineren Komponenten des ursprünglichen Sohlenmaterials transportiert werden. Den gröberen Fraktionen wird sozusagen die haltgebende Grundlage entzogen. Die stabilisierende Wirkung der Grobkomponenten resp. die Verringerung der Stabilität durch Erhöhung des Feinanteils am eingetragenen Geschiebe konnte durch die Verwendung von zwei verschiedenen Kornmischungen mit etwa gleich großem mittleren Korndurchmesser gezeigt werden. Für die erste Mischung (V13) wurden 30 % des Materials durch gröberes Korn ersetzt und lediglich 10 % durch feineres. Dadurch ist das Transportverhalten der Mischung mit dem oben beschriebenen Verhalten des Einkorn-Versuchs der groben Fraktion (V12) vergleichbar. Der geringe Anteil der feineren Fraktion hatte keine Auswirkung. Die zweite Mischung bestand zu je einem Drittel aus der feinen, der mittleren und der groben Fraktion (V14). Das Transportverhalten unterschied sich deutlich von V13, obwohl die kritischen Durchflüsse aufgrund des praktisch gleichen d_m (14,95 mm in V13 und 14,17 mm in V14) annähernd identisch sind. V14 wich auch vom Verhalten der Einkorn-Versuche der jeweiligen Zugabefraktion ab, da die Transportraten trotz Zugabe weiter anstiegen. Durch Sortierungsprozesse in Hauptströmungsrichtung sowie in vertikaler Richtung füllte die kleinste Fraktion zunächst die Pools und in der Sohle vorhandene Lücken. Die Sohlenneigung änderte sich und die Sohlenrauheit wurde geringer. Während das meiste Zugabematerial in dem entsprechenden Einkorn-Versuch der feinen Fraktion (V3) dabei aber verbunden mit relativ hohen Mengen von Sohlenmaterial bereits während der Zugabe austransportiert wurde, stiegen die Transportraten in dem Mischkorn-Versuch erst nach 60 min an. Dieses Verhalten liegt darin begründet, dass einerseits die Mobilität der feinen Fraktion durch die gröberen Komponenten reduziert und andererseits gröberes Zugabematerial von dem feineren mitgenommen wurde. Aufgrund der Verringerung der Mobilität der feinen Zugabefraktion wurde die Sohle so langsam mit dem Zugabematerial bedeckt, dass sich Sohlenmaterial nur bedingt durch lokale Änderungen löste. Aufkommende Bewegungen der Deckschicht sind durch mittransportierte gröbere Zugabefraktionen gleich wieder unterbunden worden. Erst als die Sohle vollständig mit Zugabematerial bedeckt war, stiegen die Transportraten (hauptsächlich des Zugabematerials) und gleichzeitig die mittlere Fließgeschwindigkeit deutlich an. Dieser Zeitpunkt war bedingt durch die Sohlentopographie und die gewählte Zugaberate gerade mit dem Ende der Zugabe erreicht. Nachdem das zum Trans-

port zur Verfügung stehende feine Zugabematerial ausgetragen war, nahmen die Transportraten und mit deutlicher Verzögerung auch die Fließgeschwindigkeit ab.

Im zweiten Fall (Tab. 2.9) liegt der kritische Durchfluss des Zugabematerials nur geringfügig oberhalb des herrschenden Durchflusses. Das Transportverhalten hängt jetzt stark von der Zugaberate bzw. der Zugabedauer ab. Die durch anfängliche Ablagerungen des Zugabematerials bedingten Rauheits- und Neigungsänderungen reichen aus, um den Strömungsangriff so weit zu erhöhen, dass das Material transportiert wird, ohne den Durchfluss zu erhöhen. Der zum Bedecken der Sohle erforderliche Zeitraum ist von der vorhandenen Sohlentopographie und der Zugaberate abhängig. In dieser Phase wird hauptsächlich Sohlenmaterial transportiert. Höhere Zugaberaten führen zu einer schnelleren Anpassung des betrachteten Sohlenabschnitts, damit zu einem schnelleren Transport des Zugabematerials und dadurch auch zu höheren Transportraten und erodierten Mengen des Sohlenmaterials.

Je leichter also das eingetragene Geschiebe transportiert werden kann, desto stärker wird die vorhandene Deckschicht umstrukturiert und desto mehr Sohlenmaterial wird erodiert. Dies wird durch die Versuche bestätigt, in denen der kritische Durchfluss der Zugabefraktion von Anfang an geringer ist als der herrschende Durchfluss (Fall 3, Tab. 2.9). Wie im Fall 2 erhöht eine steigende Zugaberate die Menge und die Transportrate des erodierten Sohlenmaterials. Das eingetragene Geschiebe wird wiederum auf der Sohle abgelagert, im Gegensatz zu den Fällen 1 und 2 jedoch nur kurzfristig. Die ständige Bewegung des Zugabematerials bewirkt eine stete Umstrukturierung der Sohle und damit einen andauernden Transport. Allerdings verbleibt auch in Fall 3 ein Teil des externen Geschiebes in der Sohle, wodurch eine Schicht aus Zugabematerial entsteht und die Sohle glatter wird. Diese Schicht war im allgemeinen so dünn, dass ein ständiger Kontakt zwischen dem bewegten Zugabematerial und der vorhandenen Deckschicht bestand. Mit steigender Zugaberate steigt auch die Transportrate des Zugabematerials sowie die mittlere Fließgeschwindigkeit und folglich nimmt die Belastung der Deckschicht zu. Die Erhöhung der Fließgeschwindigkeit hängt nicht nur von der geringeren Sohlenrauheit ab, sondern auch von der Korngröße des transportierten Materials. Je kleiner der Korndurchmesser ist, desto höher ist die Geschwindigkeit. Die daraus resultierenden stärkeren Impulse des Geschiebes bewirken eine zusätzliche Mobilisierung von Sohlenmaterial.

Ein gänzlich anderes Transportverhalten konnte im Fall der höchsten Zugaberate von 40 kg/m·min (V7) beobachtet werden. In diesem Versuch wurde die Sohle während der Zugabe kaum beansprucht, sondern erst mit dem Zugabeende stieg die Transportrate des Sohlenmaterials kurzfristig an. Dies ist auf die Dicke der Schicht aus Zugabematerial zurückzuführen. Im Fall von V7 bildete sich zwischen der Deckschicht und dem transportierten Zugabematerial eine weitere, immobile Schicht aus Zugabematerial, die die Deckschicht während der Zugabe schützte. Die mit den hohen Transportraten stark gestiegene mittlere Fließgeschwindigkeit führte dazu, dass mit dem Ausbleiben des Geschiebeeintrags am Zugabeende das Sohlenmaterial dem erhöhten Strömungsangriff ausgesetzt war und erodiert wurde.

Die Versuche, in denen sowohl der kritische Durchfluss des Zugabematerials als auch der vorhandenen Deckschicht überschritten ist (Fall 4 bis 6), zeigen deutlich, dass eine Sohle durch den Eintrag von Geschiebe zusätzlich belastet wird. Anstatt die Sohle vor dem Strömungsangriff zu schützen, wird beträchtlich mehr Sohlenmaterial transportiert als in ver-

gleichbaren Versuchen mit Durchflusserhöhung ohne Geschiebezugabe. Unabhängig von der anfänglichen Deckschichtstabilität wird dabei im Verhältnis zur entsprechenden Erhöhung bei Klarwasserabfluss umso mehr Sohlenmaterial erodiert, je höher der Durchfluss ist. Dies gilt auch, wenn der kritische Durchfluss der Deckschicht überschritten ist, derjenige des Zugabematerials jedoch nicht erreicht wird. Allerdings bewirkt, wie bereits zu Fall 1 angemerkt, die Verteilung des groben Zugabematerials über der Sohle ein schnelleres Abklingen des Transports.

Der Vergleich statischer Sohlenparameter wie Neigung, Rauheit, Kornverteilung und mittlere Fließgeschwindigkeit vor und nach einem Transportereignis zeigt keine systematische Änderung in Abhängigkeit der untersuchten Versuchparameter (Zugaberate, -dauer, -fraktion, -durchfluss). Die Unterschiede zwischen vorher und nachher sind häufig so gering, dass die zwischenzeitlichen Ereignisse kaum erahnt werden können.

Die bereits in der Einleitung dieser Arbeit gestellte Frage, ob eine vorhandene Deckschicht durch eingetragenes Geschiebe geschützt wird, kann eindeutig mit nein beantwortet werden. Statt dessen belastet das transportierte Material die Deckschicht zusätzlich. Dies erfolgt lokal aufgrund von Änderungen des Strömungsfeldes, solange der zur Bewegung des Zugabematerials erforderliche Durchfluss nicht erreicht wird. Ist der herrschende Durchfluss größer als der kritische, bewirken höhere Impulse der Partikel eine zusätzliche Destabilisierung von Sohlenmaterial. Die von JACKSON & BESCHTA (1984) und HASSAN & CHURCH (2000) vermutete Abminderung des maßgebenden Korndurchmessers aufgrund der Vermischung von Sohlen- und Zugabematerial wird aus zwei Gründen nicht als Hauptursache für die Mobilisierung des an sich stabilen Sohlenmaterials angesehen: erstens sind die Transportraten des Sohlenmaterials gerade dann am höchsten, wenn noch kein Zugabematerial transportiert wird, und zweitens konnte eine Vermischung der beiden Materialien nur in dem Langzeitversuch V5 beobachtet werden. Mit dem Geschiebeeintrag verbunden sind also Änderungen des Strömungsfeldes aufgrund von Änderungen der Rauheit sowie der Sohlenneigung und aufgrund der Kornbewegung. In welchem Verhältnis diese drei Faktoren zueinander stehen, d.h. ob z.B. einer der Faktoren dominant oder vernachlässigbar ist, und wie sie das Strömungsfeld beeinflussen, bleibt weiteren Forschungsarbeiten vorbehalten.

Das Zurückhalten von eingetragenen Geschiebe einerseits und die Mobilisierung von Sohlenmaterial andererseits führt zu starken Schwankungen in den Transportraten und der Kornzusammensetzung des erodierten Materials. Wie bereits mehrfach erwähnt, ändern sich die Sohlenrauheit und -neigung und damit die Fließgeschwindigkeit und der Strömungsangriff in dem Moment, in dem Geschiebe in einen Abschnitt eingetragen wird. Die Änderungen sind zunächst abhängig von der Korngröße und -zusammensetzung des eingetragenen Materials sowie von der Eintragsdauer und -rate. Weiterhin ist von Bedeutung, ob nur der kritische Durchfluss des eingetragenen Materials überschritten wird oder auch derjenige der statischen Deckschicht. Die Transportvorgänge hängen natürlich auch von der Sohlentopographie des betrachteten Abschnitts ab. Im Fall ausgeprägter Sohlenstrukturen, die in Gebirgsbächen üblich sind, kann mehr eingetragenes Geschiebe zurückgehalten werden als bei einer ebenen Deckschicht, die für flachere Mittelgebirgsflüsse typisch ist. Es ist deshalb praktisch nicht möglich, von einem statischen Zustand auf die bei mobilem Gleichgewicht zu er-

wartenden Transportraten zu schließen. Die in Kap. 2.2 aufbereiteten Ansätze zur Berechnung des Geschiebetransports in Kiesflüssen liefern dementsprechend stark abweichende Ergebnisse bezüglich der gemessenen Transportraten. Dabei nähert sich die berechnete Transportrate bei Verwendung der Formeln von SMART & JÄGGI (1983) und RICKENMANN (1990) der gemessenen Rate, wenn ein mobiles Gleichgewicht vorliegt. Dieses ist im Fall extrem hoher Zugabe- bzw. Eintragsraten und kleiner Zugabefraktionen praktisch sofort erreicht. Bei geringeren Transportraten werden selbst im Labor über mehrere Stunden konstante Randbedingungen benötigt, um das Geschiebegleichgewicht zu erreichen. Kleine Änderungen z.B. in der Kornzusammensetzung des eingetragenen Geschiebes können das Gleichgewicht schon wieder stören.

Während die Änderung der Sohlenneigung durch Ablagerung und Erosion in numerischen Modellen berücksichtigt werden kann, wird die Rauheit im allgemeinen als konstant bzw. als vom Geschiebe abhängig behandelt. Die Berücksichtigung einer vorhandenen rauen Sohle ist vermutlich aufgrund der Voraussetzung eines mobilen Gleichgewichts nicht vorgesehen. Die deutliche Verbesserung der Ergebnisse mit dem Ansatz von MEYER-PETER & MÜLLER (1949) für den Fall, dass der Parameter (k_{st}/k_r) auf die vor der Zugabe vorhandene Deckschicht bezogen wird, spricht jedoch für die Berücksichtigung der vor dem Transportereignis vorliegenden Sohlenrauheit. Auch die Änderung des Strömungsfeldes durch die Geschiebebewegung, die sich deutlich in den mit zunehmenden Transportraten steigenden Fließgeschwindigkeiten bemerkbar macht, kann nicht berücksichtigt werden, da die Kenntnisse hier nicht ausreichen. Die Frage, zu welchem Anteil die Änderungen der Neigung und der Rauheit sowie der Transport von Material an Änderungen der Geschwindigkeit beteiligt sind, muss, wie bereits erwähnt, anhand weiterer Untersuchungen beantwortet werden.

Die vorgestellten Erkenntnisse zur Wechselwirkung zwischen Sohlenstabilität und Geschiebetransport verdeutlichen, dass sich der Ablauf des Geschiebetransports und damit die Höhe der zu berechnenden Geschiebetransportraten abhängig von der Ausgangssohle und den zum Transport führenden Randbedingungen verhält. Vor allem das sich während des Transportereignisses verändernde Strömungsfeld und die dadurch veränderten Transportbedingungen können mit existierenden Geschiebetransportformeln nicht erfasst werden. Zur Lösung der komplexen Interaktionen ist es nicht ausreichend, die vorhandenen Formeln in ein numerisches Modell einzubauen. Zunächst müssen die Kenntnisse des Strömungsfeldes über rauen und bewegten Sohlen erweitert werden. Einen Beitrag hierzu liefert das folgende Kapitel, in dem in einem ersten Schritt das Geschwindigkeitsfeld über rauen Sohlen insbesondere für geringe relative Überdeckungen behandelt wird.

3 Turbulentes Geschwindigkeitsfeld über rauen Sohlen

Der in Kap. 2 aufbereitete Wissensstand zur Sohlenstabilität und zum Geschiebetransport sowie die aus den Untersuchungen zur Wechselwirkung gewonnenen Erkenntnisse zeigen die Bedeutung und gleichzeitig den Forschungsbedarf auf, der dem Strömungsfeld in Abhängigkeit der Sohlenrauheit zukommt. Mit dem Eintrag von Geschiebe wie auch mit dem Überschreiten der vorhandenen Stabilität eines betrachteten Abschnitts ändert sich nicht nur die Neigung, sondern auch die Rauheit der Sohle und damit die Fließgeschwindigkeit. Weiterhin beschleunigen oder verzögern transportierte Partikel die Strömung abhängig davon, ob der zur Bewegung erforderliche Strömungsangriff über- oder unterschritten wird. Zur Berechnung von Geschiebetransport ist also zunächst die Wissenserweiterung zur Abhängigkeit des Strömungsfeldes von der Sohlenrauheit und dem Vorhandensein bewegter Partikel erforderlich. Einen ersten Schritt liefert das vorliegende Kapitel, in dem der Stand des Wissens zum Geschwindigkeitsfeld über rauen Sohlen aufbereitet ist und Ergebnisse aus Untersuchungen unter besonderer Berücksichtigung geringer relativer Überdeckungen vorgestellt werden.

Das Geschwindigkeitsfeld einer turbulenten Strömung ($Re > 2500$) sowohl über glatten als auch über hydraulisch rauen Sohlen ($Re_* > 70$) kann zunächst in drei Hauptbereiche unterteilt werden: 1.) die Außenschicht, die sich wiederum aus einer von der freien Wasseroberfläche beeinflussten Schicht und einer Zwischenregion zusammensetzt, 2.) die innere Schicht oder Wandregion und 3.) den Porenraum. Die Wandregion setzt sich aus der logarithmischen Schicht, der Rauheitsschicht und der viskosen Grenzschicht zusammen. Dem Übergangsbereich über glatten Sohlen entspricht über rauen Sohlen die Rauheitsschicht, die nach DITTRICH ET AL. (1996) wiederum aus zwei forminduzierten Unterschichten besteht, so dass das Geschwindigkeitsfeld über rauen Sohlen in bis zu sieben Regionen eingeteilt werden kann (siehe Abb. 3.1).

In Abb. 3.2 werden die Bezeichnungen vertikaler Abmessungen eingeführt, die im folgenden verwendet und an entsprechender Stelle genauer definiert werden. Der Ursprung der vertikalen Koordinate z liegt dabei, soweit nicht anders angegeben, in Höhe der Rauheitsunterkante.

Zur Untersuchung des Geschwindigkeitsfeldes standen eindimensionale Messungen im sohlennahen Bereich über verschiedenen rauen Sohlen aus Untersuchungen im Theodor-Rehbock-Laboratorium zur Verfügung. Die Auswertung erfolgt anhand räumlich gemittelter Geschwindigkeitsprofile, weshalb neben der Herleitung der Gleichungen zur Berechnung des Geschwindigkeitsprofils auch die Grundlagen der Methode der doppelten Mittelung der Navier-Stokes-Gleichungen (zeitlich und räumlich) vorgestellt werden.

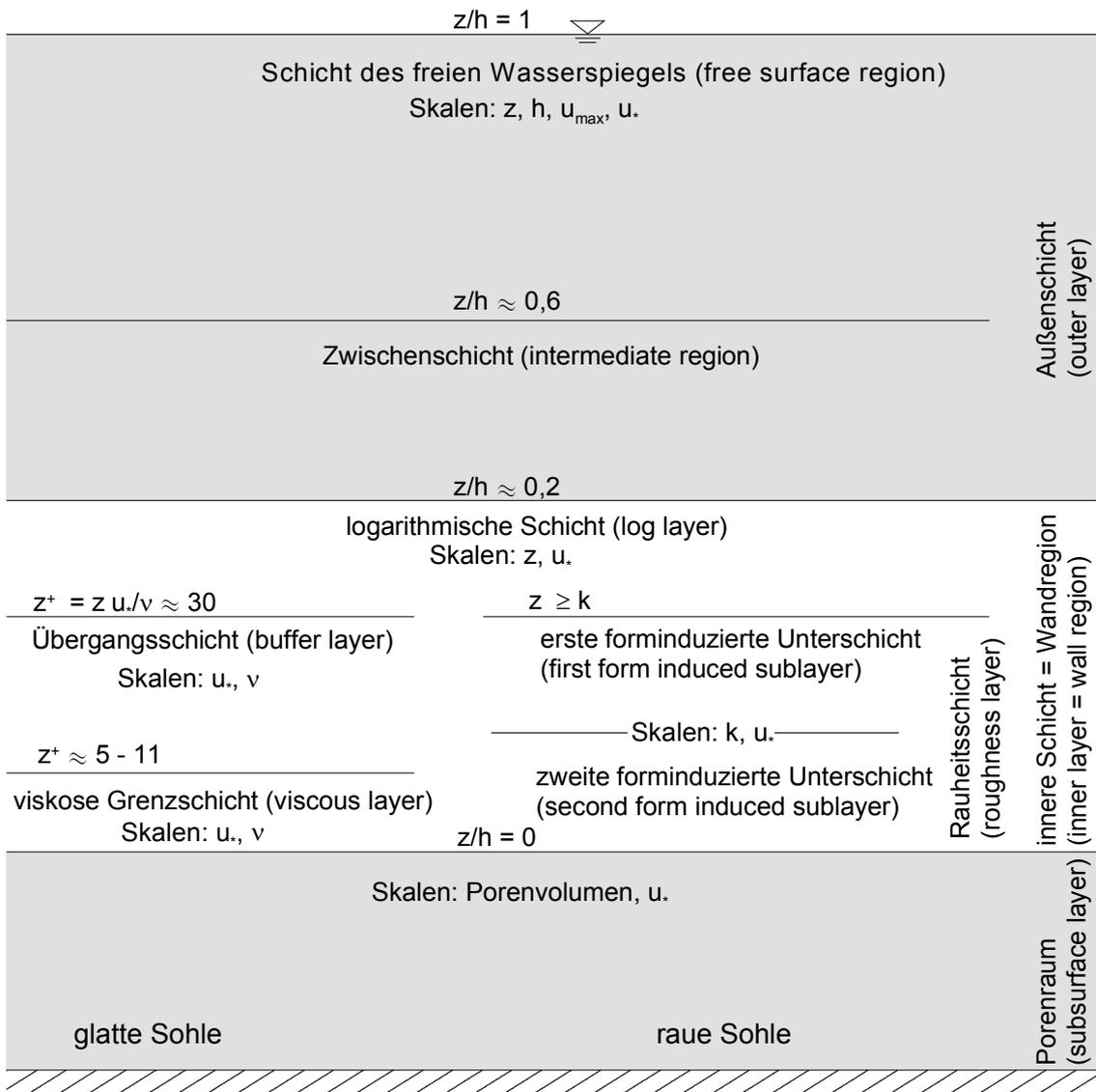


Abb. 3.1 Unmaßstäbliche Einteilung des Geschwindigkeitsfeldes über glatten und rauen Sohlen

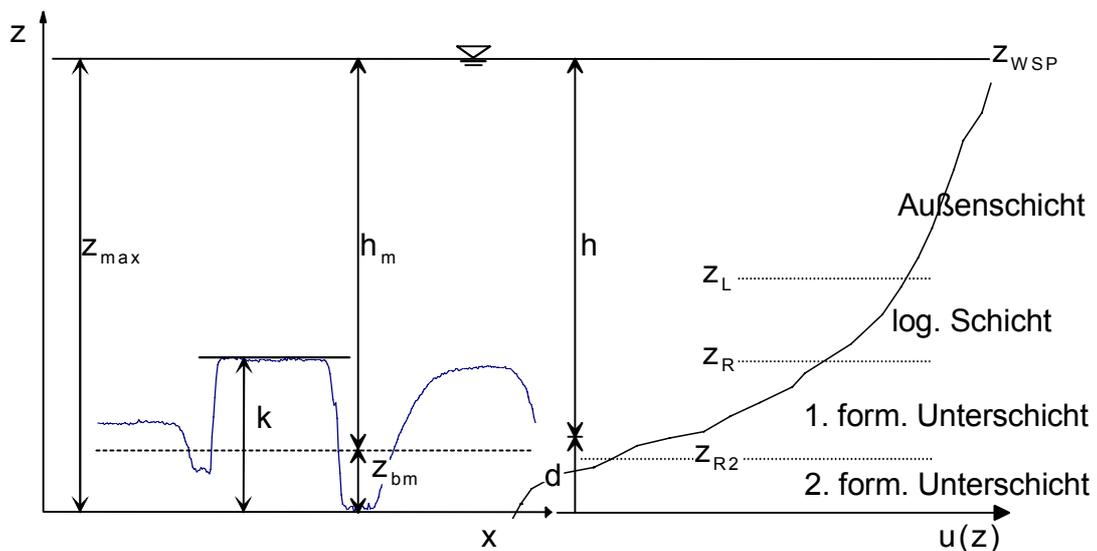


Abb. 3.2 Definitionsskizze vertikaler Abmessungen

3.1 Grundlegende Gleichungen der turbulenten Strömung

Ausgehend von den Navier-Stokes-Gleichungen werden zur Berechnung des turbulenten Strömungsfeldes die Reynolds-Gleichungen hergeleitet, die anschließend für den Spezialfall der offenen Gerinneströmung vereinfacht werden. Während mit Hilfe der Reynolds-Gleichungen die zeitlichen Schwankungen des turbulenten Strömungsfeldes erfasst werden, erfordert die Berücksichtigung der räumlichen Variabilität der Sohlenrauheit eine weitere Mittelung. Sowohl die zeitlichen als auch die räumlichen Schwankungen können mit Hilfe der doppelt gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen erfasst werden.

3.1.1 Navier-Stokes-Gleichungen

Die unter dem Namen „Navier-Stokes-Gleichungen“ bekannten Differentialgleichungen zur Beschreibung des Geschwindigkeitsfeldes setzen sich aus der Kontinuitätsgleichung und den Impulsbilanzgleichungen zusammen. Für den Fall inkompressibler Fluide, d.h. zeitlich unveränderlicher Dichte, lauten die Kontinuitätsgleichung

$$\text{div } \bar{u} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.1a)$$

und die Impulsbilanzgleichungen

$$\frac{d\bar{u}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \text{ div grad } \bar{u} + \bar{g} \quad (3.1b)$$

bzw. in ausgeschriebener Form

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \nu \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \nu \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \nu \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \nu \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \underbrace{u \cdot \frac{\partial w}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial w}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial w}{\partial z}}_{\text{Advektion}} &= \underbrace{-\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z}}_{\text{Druck}} + \underbrace{\nu \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}}_{\text{Viskosität}} + \underbrace{-g}_{\text{Gravitation}} \end{aligned}$$

wobei hier nur die Gravitationskraft G als äußere Kraft berücksichtigt ist. Hierin sind u, v und w die Komponenten des Geschwindigkeitsvektors in x, y und z-Richtung eines kartesischen Koordinatensystems, d.h. horizontal in Richtung der Hauptströmung sowie lateral und in vertikaler Richtung. p ist der Druck, ρ die Dichte des Fluids und ν die kinematische Viskosität.

3.1.2 Reynolds-Gleichungen

Im Gegensatz zum laminaren Strömungsfeld ist das turbulente Strömungsfeld durch zeitlich stark schwankende Größen charakterisiert. Mit Hilfe der folgenden Rechenregeln für die Mittelung zeitlich fluktuierender Größen leiten sich die Reynolds-Gleichungen her, die das turbulente Strömungsfeld beschreiben.

Der aktuelle Wert einer zeitlichen Schwankungen unterlegenen Größe f setzt sich in einer turbulenten Strömung aus dem zeitlichen Mittelwert \bar{f} und der momentanen Schwankung f' zusammen. Erfolgt die Mittelung über ein hinreichend langes Zeitintervall, dann ist der Mittelwert der Schwankungen gleich Null und die Mittelung über die mittleren Werte ergibt wiederum den Mittelwert:

$$f = \bar{f} + f' \qquad \bar{f}' = 0 \qquad \overline{\bar{f}} = \bar{f}.$$

Die zeitliche Mittelung zweier nichtlinearer Größen f_1 und f_2 lautet also:

$$\overline{f_1 \cdot f_2} = \overline{(f_1 + f_1') \cdot (f_2 + f_2')} = \overline{f_1 f_2} + \overline{f_1' f_2'} + \overline{f_1 f_2'} + \overline{f_1' f_2} = \overline{f_1 f_2} + \overline{f_1' f_2'}.$$

Weiterhin gilt

$$\frac{\partial \bar{f}}{\partial x} = \frac{\partial \bar{f}}{\partial x} \quad \text{und} \quad \frac{\partial^2 \bar{f}}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial \bar{f}}{\partial x}$$

sowie die Produktregel

$$\overline{f_1 \frac{\partial f_2}{\partial x}} = \frac{\partial \overline{f_1 f_2}}{\partial x} - \overline{f_2 \frac{\partial f_1}{\partial x}}.$$

Die zeitlich gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen, d.h. die Reynolds-Gleichungen lauten damit für inkompressible Fluide ($\rho = \text{const.}$):

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad \text{und} \quad \frac{\partial \bar{u}'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}'}{\partial z} = 0 \tag{3.2a}$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} - \frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} - \frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \tag{3.2b}$$

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \nu \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} - \underbrace{\frac{\partial \overline{w'u'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{w'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{w'w'}}{\partial z}}_{\text{Reynolds Spannungen}} - g.$$

Durch die Berücksichtigung zeitlicher Schwankungen treten in turbulenten Strömungen neben den viskosen Reibungskräften die sogenannten Schein- oder Reynoldsspannungen auf, die durch den Reynolds-Spannungstensor R beschrieben werden:

$$R = \begin{pmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{u'w'} & \overline{w'w'} \end{pmatrix}.$$

Die Reynolds-Gleichungen bilden kein geschlossenes Gleichungssystem, da mit den Korrelationen der Geschwindigkeitsschwankungen zusätzliche Unbekannte auftreten. Die Lösung

erfordert vereinfachende Annahmen, die im folgenden für die offene Gerinneströmung vorgestellt werden.

Zuvor soll jedoch eine Übersicht über die physikalische Interpretation der statistischen Momente der Verteilung der zeitlichen Schwankungen gegeben werden.

Die Summe der Autokorrelationen der Geschwindigkeitsschwankungen in x-, y- und z-Richtung ist proportional der turbulenten kinetischen Energie pro Masse:

$$k = \frac{\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}}{2} = \frac{\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2}{2}.$$

Die Standardabweichung σ der turbulenten Schwankungen z.B. für die Hauptströmungskomponente u

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n u_i'^2}{n-1}} = \sqrt{\overline{u'u'}},$$

die häufig auch als rms-Wert bezeichnet wird, ist somit ein Maß für die turbulente kinetische Energie und wird als Turbulenzintensität bezeichnet. Das dritte und vierte Zentralmoment geben Informationen über übergeordnete Wirbelstrukturen (siehe Kap. 3.2.4.3). Durch die Ausbildung makroskaliger Wirbel entsteht eine gewisse Ordnung in der turbulenten Strömung, wobei die einzelnen Wirbelformationen nicht von langer Dauer sind. Sie zerbrechen in sogenannten bursts, die wiederum aus aufwärtsgerichteten ejections ($u' < 0$, $w' > 0$) und zur Sohle hin gerichteten sweeps ($u' > 0$, $w' < 0$) bestehen.

Die Schiefe S, das dritte Zentralmoment, beschreibt den advektiven Transport, d.h. die reine Umverteilung ohne Produktion oder Vernichtung turbulenter kinetischer Energie z.B. der Geschwindigkeitskomponente u in die Richtung der Komponente v:

$$S_{uv} = \frac{\sum_{i=1}^n (u_i'^2 \cdot v_i')}{(n-1) \cdot \sigma_u^2 \cdot \sigma_v} = \frac{\overline{u'u'v'}}{\sigma_u^2 \cdot \sigma_v}.$$

Ist z.B. die Schiefe S_{uv} positiv, dann ist der Transport zur Sohle hin gerichtet (sweep), während ein negatives Vorzeichen aufwärtsgerichteten Transport (ejection) kennzeichnet.

Das als Flachheit F oder auch Exzess bezeichnete vierte Zentralmoment der Häufigkeitsverteilung gibt den Grad der Schwankung der turbulenten kinetischen Energie wieder. Da die Flachheit meistens um den Wert 3 schwankt, wird heutzutage die Kurtosis K_u bevorzugt verwendet. Wiederum am Beispiel der Geschwindigkeitskomponente u lautet die Kurtosis:

$$K_u = F_u - 3 = \frac{\sum_{i=1}^n u_i'^4}{(n-1) \cdot \sigma_u^4} - 3 = \frac{\overline{u'u'u'u'}}{\sigma_u^4} - 3.$$

Nach DURST ET AL. (1987) bedeutet eine negative Kurtosis eine hohe Burstfrequenz. Eine positive Kurtosis, d.h. eine schmale, spitze Verteilung, weist also eine geringe Häufigkeit von aufbrechenden kohärenten Strukturen (vgl. Kap. 3.2.4.3) aus.

3.1.3 Offene Gerinneströmung

Zur Vereinfachung der Reynolds-Gleichungen (Gl. 3.2) kann für den Fall der offenen Gerinneströmung angenommen werden, dass es sich um eine ebene zweidimensionale Scherströmung handelt. Damit entfallen alle Ableitungen in lateraler Richtung, d.h. $\partial/\partial y = 0$, und die Geschwindigkeiten quer zur Hauptströmungsrichtung sind vernachlässigbar, d.h. $v = 0$. Weiterhin ist die Grenzschicht voll ausgebildet, so dass die vertikale Geschwindigkeitskomponente sowie Änderungen der Geschwindigkeit entlang der Fließrichtung vernachlässigbar sind, d.h. $w = 0$ und $\partial/\partial x = 0$. Die Änderung des Drucks mit der x-Richtung bleibt erhalten, da sich aufgrund der Lage des Koordinatensystems die Höhenlage des freien Wasserspiegels ändert. Schließlich entfallen mit der Annahme einer stationären Strömung die Ableitungen nach der Zeit, also ist $\partial/\partial t = 0$.

Mit diesen Annahmen bzw. Einschränkungen reduzieren sich die Reynolds-Gleichungen (Gl. 3.2) zu

$$0 = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \cdot \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} - \frac{\overline{\partial u' w'}}{\partial z} \quad (3.3a)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} - g$$

Die Geschwindigkeit in Fließrichtung ändert sich also nur noch mit der Tiefe z

$$\bar{u} = \bar{u}(z),$$

wobei aufgrund der Haftbedingung an der festen Sohle ($z = 0$) sowohl die mittlere Geschwindigkeit als auch ihre Schwankungsgröße gleich Null ist:

$$u(z = 0) = 0.$$

Da das Koordinatensystem stets so gewählt wird, dass die z-Achse senkrecht auf der Gerinnesohle steht, teilt sich der Gravitationsterm in geneigten Gerinnen in einen Anteil parallel ($g_x = g \cdot \sin \alpha$) zur Sohle, d.h. in Hauptströmungsrichtung, und einen Anteil normal ($g_z = g \cdot \cos \alpha$) zur Sohle auf. Unter der oben getroffenen Annahme stationärer Verhältnisse entfällt mit der Drehung des Koordinatensystems der Druckterm im ersten Teil von Gl. (3.3a), so dass diese jetzt wie folgt lautet:

$$0 = \nu \cdot \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} - \frac{\overline{\partial u' w'}}{\partial z} - g \cdot \sin \alpha \quad (3.3b)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} - g \cdot \cos \alpha.$$

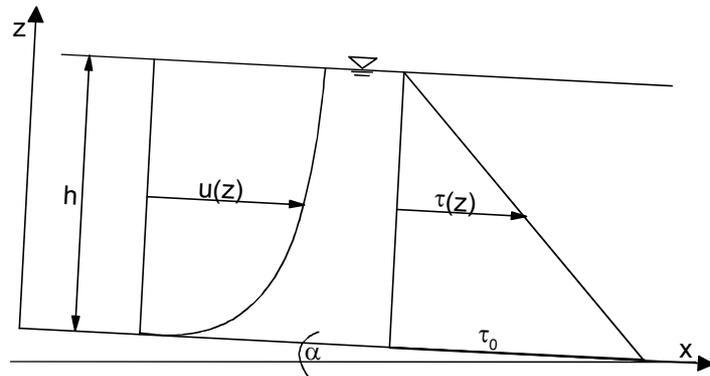
Die Integration des zweiten Teils der Gl. (3.3b) von der Tiefe z bis zum freien Wasserspiegel z_{WSP} liefert die hydrostatische Druckbedingung:

$$p = -\rho \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot (z_{WSP} - z),$$

wobei $\cos \alpha$ für kleine Neigungswinkel zu 1 gesetzt wird und der Druck an der freien Oberfläche zu 0. Die x-Komponente der Gewichtskraft des Wassers in der Tiefe z pro Fläche $\Delta A_0 = \Delta x \cdot \Delta y$ ist also gleich der sohlenparallelen Spannung:

$$\tau(z) = \frac{G_x}{\Delta A_0} = \rho \cdot g \cdot (h - z) \cdot \sin \alpha = \rho \cdot g \cdot l_s \cdot h \cdot \left(1 - \frac{z}{h}\right) = \tau_0 \cdot \left(1 - \frac{z}{h}\right). \quad (3.4)$$

Die vertikale Verteilung der aus dem Druck resultierenden Schubspannung $\tau(z)$ und des Geschwindigkeitsprofils sind in Abb. 3.3 schematisiert dargestellt. Für geringe Neigungen kann



der Sinus ungefähr gleich der Sohlenneigung angenommen werden. $\tau_0 = \rho \cdot g \cdot h \cdot l_s$ ist die Sohlenschubspannung in der Tiefe $z = 0$. Für den Fall, dass kein Normalabfluss vorliegt, ist die Sohlenneigung l_s durch die Neigung der Energielinie l_E zu ersetzen. Die Differenz zwischen freiem Wasserspiegel und fester Sohle ist die Wassertiefe h.

Abb. 3.3 Vertikales Profil der Geschwindigkeit und der Schubspannung in turbulenten Strömungen

Die Integration des ersten Teils von Gl. (3.3b) von der Tiefe z bis zum freien Wasserspiegel z_{WSP} liefert:

$$g \cdot (z_{WSP} - z) \cdot \sin \alpha = \nu \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \overline{u'w'}.$$

Mit Gl. (3.4) und der Definition der Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{g \cdot h \cdot l_s}, \quad (3.5)$$

die eine charakteristische Größe der Schubspannung in den Dimensionen einer Geschwindigkeit ist, lautet die Gleichung des vertikalen Geschwindigkeitsprofils turbulenter Strömungen

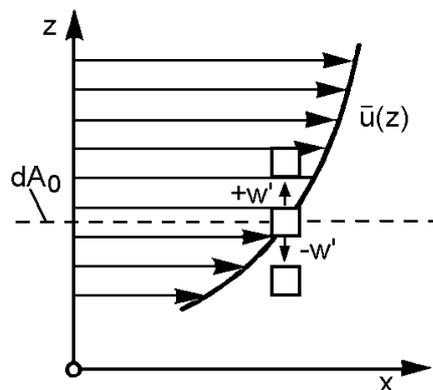
$$\frac{\tau(z)}{\rho} = \frac{\tau_0}{\rho} \cdot \left(1 - \frac{z}{h}\right) = u_*^2 \cdot \left(1 - \frac{z}{h}\right) = \nu \cdot \frac{d\bar{u}}{dz} - \overline{u'w'}. \quad (3.6)$$

Nach dem Newton'schen Zähigkeitsgesetz ist eine Schubspannung das Produkt einer Viskosität und eines Geschwindigkeitsgradienten, so dass der erste Term auf der rechten Seite von Gl. (3.6) als viskose Schubspannung bezeichnet werden kann:

$$\frac{\tau_V}{\rho} = \nu \cdot \frac{d\bar{u}}{dz}.$$

Die Wirkung des Terms $\overline{u'w'}$ kann in Analogie zum molekularen Massentransport mit Hilfe des Impulssatzes wie folgt erklärt werden (SCHLICHTING & GERSTEN, 1997): Bedingt durch

Geschwindigkeitsschwankungen in Hauptströmungsrichtung x wird pro Zeiteinheit dt in vertikaler Richtung z die Fluidmasse



$$dA_0 \cdot \rho \cdot w' \cdot dt$$

durch eine sohlenparallele Fläche dA_0 transportiert (vgl. Abb. 3.4). Die x -Komponente des Impulses I ist

$$dI = dA_0 \cdot \rho \cdot u' \cdot w' \cdot dt .$$

und die zeitliche Mittelung liefert den Impulsfluss

$$d\bar{I} = dA_0 \cdot \rho \cdot \overline{u' w'} .$$

Abb. 3.4 Definitionsskizze zur Impulsübertragung (nach SCHLICHTING & GERSTEN, 1997)

Wird der Impulsfluss pro Fläche dA_0 betrachtet, liefert er die durch turbulente Schwankungen der Geschwindigkeit hinzukommende turbulente Schubspannung, die der Strömung entgegengesetzt ist:

$$\frac{d\bar{I}}{dA_0} = \rho \cdot \overline{u' w'} = -\tau_T .$$

Nach Boussinesq (HAGER, 1998) wird in Analogie zum Newton'schen Zähigkeitsgesetz die turbulente Schubspannung ebenfalls als Produkt des Geschwindigkeitsgradienten und einer Viskosität, und zwar der Wirbelviskosität ν_T , ausgedrückt, so dass die Differentialgleichung zur Berechnung des Geschwindigkeitsprofils einer offenen Gerinneströmung wie folgt lautet:

$$\frac{\tau(z)}{\rho} = u_*^2 \cdot \left(1 - \frac{z}{h}\right) = \nu \cdot \frac{d\bar{u}}{dz} - \overline{u' w'} = \frac{\tau_V}{\rho} + \frac{\tau_T}{\rho} = \nu \cdot \frac{d\bar{u}}{dz} + \nu_T \cdot \frac{d\bar{u}}{dz} . \quad (3.7)$$

3.1.4 Doppelte Mittelung der Navier-Stokes-Gleichungen

Die bisherige Herleitung der Gleichungen zur Berechnung des Geschwindigkeitsprofils erfolgte für glatte Sohlen. Die räumliche Variabilität unregelmäßiger Rauheiten erfordert jedoch besonders im sohlennahen Bereich ihre Berücksichtigung. Diese kann durch die Verknüpfung der zeitlich gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen mit gemittelten Rauheitsparametern, z.B. mit einem charakteristischen Korndurchmesser, nicht in zufriedenstellender Weise erreicht werden, sondern benötigt die Auflösung der Rauheitsstruktur. Auch die Addition eines gesonderten Druckkraftansatzes kann den Einfluss der Rauheit nicht erfassen, da die Turbulenz der Strömung unterdrückt wird. Der Einfluss liegt nach WILSON & SHAW (1977) in dem Entzug von Impuls aus der Strömung, der Konvertierung kinetischer Energie der mittleren Strömung in turbulente kinetische Energie, der Auflösung großskaliger Turbulenz in kleinskalige sowie in der Vermehrung der turbulenten Energie durch Konvektion.

WILSON & SHAW (1977) veröffentlichten zeitgleich mit SMITH & MCLEAN (1977) einen Ansatz zur Berücksichtigung räumlicher Unregelmäßigkeiten auf das atmosphärische resp. hydraulische Strömungsfeld. Während SMITH & MCLEAN (1977) das vertikale Geschwindigkeitsfeld

einer Wasserströmung über einer gewellten Sohle entlang einer Linie in Hauptströmungsrichtung mittelten, führten WILSON & SHAW (1977), die die Rauheitswirkung von Vegetation auf Windströmungen untersuchten, die räumliche Mittelung in Ebenen parallel zur Sohle durch. Die Methode wurde überwiegend auf dem Feld der atmosphärischen Forschung weiterentwickelt (RAUPACH & SHAW, 1982; RAUPACH ET AL., 1991). LÓPEZ & GARCÍA (2001) überprüften die Anwendbarkeit der Methode der doppelten Mittelung für die Turbulenzmodellierung mit dem $k-\varepsilon$ und dem $k-\omega$ Modell. Hierzu führten sie zunächst Messungen des turbulenten Geschwindigkeitsfeldes einer offenen Gerinneströmung über und zwischen starren Bewuchselementen durch. Die gute Übereinstimmung der numerischen Modellierungen mit den Labormessungen ließ die Autoren die Erforderlichkeit der doppelten Mittelung betonen.

NIKORA ET AL. (2001) führten den Ansatz von GIMENEZ-CURTO & CORNIERO LERA (1996) weiter, indem sie die vertikale Veränderlichkeit der Rauheitsdichte mit in die Betrachtung einbezogen. Anstelle der vom Fluid eingenommenen Fläche A_f berücksichtigen sie die Änderung der Rauheit mit der Tiefe durch einen normierten Parameter A_R , der das Verhältnis aus A_f zur Gesamtfläche A_0 , über die gemittelt wird, darstellt:

$$A_R = \frac{A_f}{A_0}.$$

Oberhalb der Rauheitselemente wird der gesamte Bereich der zur Sohle parallelen Fläche vom Wasser eingenommen, d.h. $A_f = A_0$ und damit ist $A_R = 1$. Nach unten hin nimmt der von den Rauheitselementen eingenommene Bereich zu, so dass A_f und damit A_R abnehmen. An der Unterkante der Rauheitselemente erreicht A_R bei undurchlässigen Sohlen den Wert 0. Bei durchlässigen Sohlen kann für A_R die Porosität angenommen werden. Der Parameter A_R ist grundsätzlich eine Funktion von x , y und z . Gelingt es, die geometrische Rauheitsfunktion $A_R = f(x,y,z)$ zu bestimmen, dann ist es möglich, die Änderung der durch die Rauheit beanspruchten Fläche über das Volumen zu berücksichtigen.

Die räumliche Mittelung wird analog zur zeitlichen Mittelung durchgeführt, so dass die aktuelle Größe f die Summe aus dem räumlichen Mittelwert $\langle f \rangle$ und den räumlichen Schwankungen f'' ist:

$$f = \langle f \rangle + f''.$$

Die Summe aus der doppelt gemittelten Größe $\langle \bar{f} \rangle$ und den zeitlich gemittelten rauheitsinduzierten Schwankungen $\tilde{f} = \overline{f''}$ ergibt dann die lokale, zeitlich gemittelte Geschwindigkeit \bar{f} :

$$\bar{f} = \langle \bar{f} \rangle + \tilde{f}.$$

Während die zeitliche Mittelung durch den Überstrich symbolisiert wird, kennzeichnen die eckigen Klammern die räumliche Mittelung. Die zeitlichen Schwankungen sind durch ein Apostroph gekennzeichnet, die räumlichen durch zwei. Die Tilde kennzeichnet die zeitlich gemittelten rauheitsinduzierten Schwankungen.

Für die räumliche Mittelung gelten prinzipiell die gleichen Regeln wie für die zeitliche Mittelung, mit dem Unterschied, dass der Mittelwert der Ableitung der (zeitlich gemittelten) räumli-

chen Schwankungen nicht gleich der Ableitung der räumlichen Mittelung der (zeitlich gemittelten) Schwankungen ist (RAUPACH & SHAW, 1982), d.h.

$$\left\langle \frac{\partial f''}{\partial x} \right\rangle \neq \frac{\partial \langle f'' \rangle}{\partial x} \quad \text{und} \quad \left\langle \frac{\partial^2 f''}{\partial x^2} \right\rangle \neq \frac{\partial}{\partial x} \left\langle \frac{\partial f''}{\partial x} \right\rangle$$

bzw.

$$\left\langle \frac{\partial \tilde{f}}{\partial x} \right\rangle \neq \frac{\partial \langle \tilde{f} \rangle}{\partial x} \quad \text{und} \quad \left\langle \frac{\partial^2 \tilde{f}}{\partial x^2} \right\rangle \neq \frac{\partial}{\partial x} \left\langle \frac{\partial \tilde{f}}{\partial x} \right\rangle.$$

Die doppelt gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen lauten dann unter Einbeziehung der von der Rauheit beanspruchten Fläche:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t} + \langle \bar{u}_j \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} = & - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \bar{p} \rangle}{\partial x_i} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} \right\rangle}_{\text{Formwiderstand}} + \nu \frac{\partial^2 \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j^2} + \underbrace{\nu \left\langle \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j^2} \right\rangle}_{\text{viskoser Widerstand}} + g_i - \frac{1}{A_R} \frac{\partial A_R \langle \bar{u}_i' u_j' \rangle}{\partial x_j} - \underbrace{\frac{1}{A_R} \frac{\partial A_R \langle \tilde{u}_i \tilde{u}_j \rangle}{\partial x_j}}_{\text{Rauheitsspannung}} \end{aligned} \tag{3.8}$$

$$\frac{\partial A_R \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} = 0.$$

wobei in dieser Schreibweise die übliche Summationskonvention gilt, d.h. über doppelt auftretenden Indizes ist zu summieren.

Entsprechend den Reynoldsspannungen, die durch die zeitliche Mittelung auftreten, enthält Gl. (3.8) die sogenannten Rauheitsspannungen, die zwischen den Rauheitselementen, ebenso wie die Reynoldsspannungen, eine Funktion der Tiefe sind, sofern sich die von der Rauheit beanspruchte Fläche mit der Tiefe ändert. Weiterhin sind der rauheitsinduzierte viskose Widerstand und der Formwiderstand explizit enthalten, so dass ein gesonderter Kräfteansatz nicht länger erforderlich ist. Die rauheitsinduzierten Terme treten per Definition nur in der Rauheitsschicht auf.

Gl. (3.8) kann jetzt für die einzelnen Bereiche des Geschwindigkeitsfeldes nach Abb. 3.1 gelöst werden. An dieser Stelle soll jedoch nur der Bereich oberhalb der Rauheitsschicht betrachtet werden, da die durch die doppelte Mittelung gegebenen Möglichkeiten im Rahmen dieser Arbeit nicht genutzt werden können.

Mit den gleichen Vereinfachungen wie zur Herleitung von Gl. (3.6) reduziert sich Gl. (3.8) für den Geschwindigkeitsbereich oberhalb der Rauheitsschicht zu:

$$0 = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \langle \bar{p} \rangle}{\partial x} \cdot v \cdot \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial z} - \langle \bar{u}'w' \rangle$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \langle \bar{p} \rangle}{\partial z} - g.$$

Weiterhin folgt nach Drehung des Koordinatensystems wie in Kap. 3.1.3:

$$\frac{\tau(z)}{\rho} = \frac{\tau_0}{\rho} \cdot \left(1 - \frac{z}{h}\right) = u_*^2 \cdot \left(1 - \frac{z}{h}\right) = v \cdot \frac{d \langle \bar{u} \rangle}{dz} - \langle \bar{u}'w' \rangle.$$

Der Vergleich mit Gl. (3.6) zeigt, dass die zeitlich gemittelten Geschwindigkeiten direkt durch die doppelt gemittelten Geschwindigkeiten ersetzt werden können.

Bei ausreichender Dichte des Messrasters in der x-y-Ebene kann weiterhin die gleiche statistische Auswertung der räumlichen Schwankungen durchgeführt werden, wie sie bei den zeitlichen Schwankungen erfolgt. Die Standardabweichung beschreibt dann die rauheitsbedingten Schwankungen der mittleren Geschwindigkeit, z.B. für die Hauptströmungskomponente u:

$$\sigma_{\bar{u}} = \sqrt{\langle \tilde{u} \tilde{u} \rangle}.$$

3.2 Schichten des vertikalen Geschwindigkeitsfeldes

Nachdem im vorangehenden Abschnitt die Grundgleichungen zur Berechnung des Geschwindigkeitsprofils hergeleitet worden sind, werden im folgenden die Charakteristika der einzelnen Bereiche des vertikalen Geschwindigkeitsprofils entsprechend Abb. 3.1 beschrieben. Die Aufbereitung des Wissensstandes erfolgt anhand der zeitlich gemittelten Geschwindigkeiten. Der Schwerpunkt liegt auf der Beschreibung des Wandbereichs. Neben dem Stand des Wissens werden die zur Datenanalyse verwendeten Gleichungen der Rauheitsschicht und des logarithmischen Bereichs hergeleitet.

3.2.1 Porenraum

Die Gesetzmäßigkeiten des vertikalen Geschwindigkeitsprofils im Porenraum sind bisher noch weitestgehend unbekannt. Laut SHIMIZU ET AL. (1990) folgt es einer Exponentialfunktion, d.h. die zunächst von der Strömung im freien Wasserkörper beeinflusste Geschwindigkeit im Porenraum nimmt kontinuierlich ab, bis sie ab einer gewissen Tiefe einen konstanten Wert erreicht. Die Autoren definierten als Grenze zwischen Wandregion und Porenraum die Oberkante des aus Glaskugeln bestehenden Porenkörpers und nannten die dort auftretende, charakteristische Geschwindigkeit u_{shift} . NAKAGAWA ET AL. (1988) stellten weiterhin fest, dass u_{shift} abhängig von der Höhe des Porenkörpers ist. Letztere haben diese Geschwindigkeit jedoch nicht gemessen, sondern durch Extrapolation des logarithmischen Geschwindigkeitsprofils bestimmt.

Basierend auf theoretischen Überlegungen stellen KOENDERS ET AL. (2000) die exponentielle Verteilung des vertikalen Geschwindigkeitsprofils im Porenraum in Frage. Anstatt einer mit der Tiefe kontinuierlich abnehmenden Geschwindigkeit propagieren sie eine zunächst starke Geschwindigkeitsabnahme im obersten Sedimenthorizont. Grund dafür ist die Penetration hochfrequenter Druckschwankungen, deren Ursprung das turbulente sohlennahe Strömungsfeld ist. Mit zunehmender Tiefe nimmt die Geschwindigkeit wieder zu und erreicht dann ab einer gewissen Tiefe einen konstanten Wert.

Die den hydraulischen Austausch zwischen freier Wassersäule und Porenraum bewirkenden Prozesse werden derzeit am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik untersucht (VOLLMER ET AL., 2002).

3.2.2 Viskose Grenzschicht

In der viskosen Grenzschicht ist die Turbulenz der Strömung gegenüber der Zähigkeit des Wassers vernachlässigbar und Gl. (3.6) reduziert sich zu

$$\frac{\tau(z)}{\rho} = \frac{\tau_0}{\rho} \cdot \left(1 - \frac{z}{h}\right) = u_*^2 \cdot \left(1 - \frac{z}{h}\right) = \nu \cdot \frac{d\bar{u}}{dz}.$$

Die kinematische Zähigkeit ν ist eine Stoffkonstante, deren Wert für Süßwasser infolge der geringen Temperaturabhängigkeit mit $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ angenommen werden kann. Die Integration liefert

$$\frac{\bar{u}(z)}{u_*} = \frac{u_* \cdot z}{\nu} \cdot \left(1 - \frac{z}{2 \cdot h}\right) + \text{const.}$$

Aus der Haftbedingung $\bar{u}(z=0) = 0$ folgt, dass die Integrationskonstante gleich Null ist. Außerdem ist der Term $\left(1 - \frac{z}{2 \cdot h}\right)$ für kleine Wandabstände z/h vernachlässigbar, d.h. die Schubspannung wird als konstant angenommen, so dass die Geschwindigkeitsverteilung in der Grenzschicht linear ist und nach der als *universelles Wandgesetz* bekannten Gl. (3.9) berechnet werden kann (z.B. SCHLICHTING & GERSTEN, 1997):

$$\frac{\bar{u}(z)}{u_*} = \frac{u_* \cdot z}{\nu}. \quad (3.9)$$

Die Dicke δ_v der viskosen Grenzschicht berechnet sich mit der kinematischen Zähigkeit ν und der Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit u_* zu

$$\delta_v = (5 \div 11) \cdot \frac{\nu}{u_*}, \quad (3.10)$$

wobei der Faktor aus zahlreichen Messungen über glatten Sohlen bestimmt wurde.

Die Haftbedingung gilt natürlich nur an einer festen Berandung, weshalb die Integrationskonstante im Fall eines mehrschichtigen Sohlenaufbaus z.B. aus der Geschwindigkeit an der Grenze zur Porenströmung zu bestimmen ist. Da allerdings die Grenzschicht Gl. (3.10) zufolge bereits bei einer Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit von $u_* = 0,5 \text{ cm/s}$, die über

rauen Sohlen bei weitem überschritten wird, nur noch etwa 1 - 2 mm stark ist, spielt sie ohnehin keine Rolle. ROTTA (1950) schloss aus der Reanalyse der Daten von NIKURADSE (1933a und b), dass die viskose Grenzschicht bereits ab $Re_* = 54$ nicht mehr vorhanden ist.

3.2.3 Rauheitsschicht

O'LOUGHLIN & ANNAMBHOTLA (1969) wie auch später NAKAGAWA ET AL. (1988) unterteilten das wandnahe Strömungsfeld über rauhen Sohlen in die logarithmische Schicht und eine Rauheitsschicht, die sozusagen den Übergangsbereich (= buffer layer) glatter Sohlen ersetzt (vgl. Abb. 3.1). Es wurde angenommen, dass die Viskosität des Fluids vernachlässigbar ist und die turbulente Wirbelviskosität ν_T durch die rauheitsinduzierte Wirbelviskosität ν_R ersetzt werden kann, die gleich dem Produkt der Mischungsweglänge l_R und der Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit u_* gesetzt wird. Innerhalb der Rauheitsschicht überlagern Ablösungen an den Rauheitselementen die turbulenten Schwankungen des freien Strömungsfeldes und bestimmen die Größe der Wirbelviskosität, die vermutlich von der Rauheitsform und -dichte abhängt, aber über die Tiefe als konstant angenommen werden kann. Die Linearität des Geschwindigkeitsprofils in der Rauheitsschicht wurde z.B. von DITTRICH ET AL. (1996), NIKORA ET AL. (2001) und NIKORA & MCLEAN (2001) in Untersuchungen des Strömungsfeldes über Glaskugeln und Würfeln, Halbkugeln resp. stilisierten Dünen bestätigt.

Ebenso wie über glatten Sohlen am Übergang von viskoser Grenzschicht zur Übergangsschicht ändert sich auch über rauhen Sohlen in Höhe der oberen Grenze der Rauheitsschicht nicht nur das Profil der mittleren Geschwindigkeit, sondern auch die höheren statistischen Momente weisen markante Punkte auf (Abb. 3.5): die relative Turbulenzintensität σ_u/u_* ist maximal, die Schiefe S_u weist einen Vorzeichenwechsel von positiv nach negativ auf, was bedeutet, dass der Transport der turbulenten kinetischen Energie nicht mehr zur Sohle hin gerichtet ist, sondern in Richtung Außenströmung, und die Verteilung der Flachheit F_u hat ein relatives Minimum, d.h. die Schwankungen der turbulenten kinetischen Energie sind reduziert.

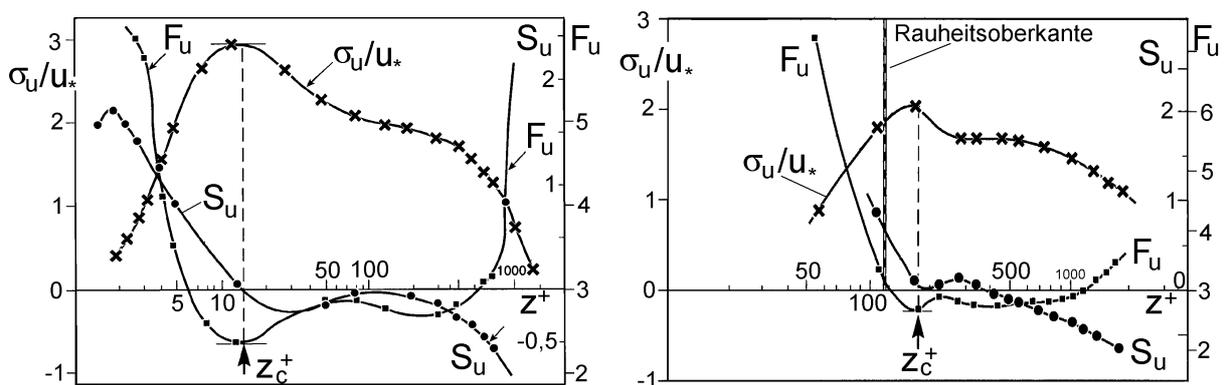


Abb. 3.5 Verteilung der relativen Turbulenzintensität, Schiefe und Flachheit über glatten und rauhen Sohlen (nach DITTRICH ET AL., 1996; modifiziert)

Die Höhe, in der die oben genannten Kriterien zutreffen, ist in Abb. 3.5 mit $z_c^+ = z_c \cdot u_* / \nu$ bezeichnet. Im Fall der glatten Sohle ist dies die Grenze zwischen viskoser Grenzschicht und Übergangsschicht. Über einer rauhen Sohle entspricht z_c^+ der dimensionslosen Höhe der

Rauheitsschicht. In der vorliegenden Arbeit wird die Grenze zwischen Rauheitsschicht und logarithmischer Schicht mit z_R bezeichnet und wird nicht als dimensionslose Größe dargestellt.

NAKAGAWA ET AL. (1988) definierten als den Beginn der Rauheitsschicht z_R diejenige Höhe, in der die Reynoldsspannung $-\overline{u'w'}$ ihr Maximum erreicht. Bis hierhin nimmt $-\overline{u'w'}$ vom freien Wasserspiegel kommend linear mit der Tiefe zu. Ähnlich wie die turbulente Schubspannung bei glatten Sohlen durch die Viskosität unterdrückt wird, wird sie innerhalb der Rauheitsschicht u.a. durch Formwiderstände gedämpft. Die Degeneration der Verteilung der Reynoldsspannung bedingt eine Modifizierung des vertikalen Geschwindigkeitsprofils, so dass keine logarithmische Verteilung vorliegt. Laut NAKAGAWA ET AL. (1991) kann dies auch nicht durch Anpassen des vertikalen Versatzes d (siehe Kap. 3.2.4.2) erreicht werden.

Im allgemeinen schließt die Rauheitsschicht nicht mit der Oberkante der Rauheitselemente ab, da auch oberhalb der Rauheitselemente Wirbelablösungen das Strömungsfeld beeinflussen. Sie liegt, vermutlich wiederum in Abhängigkeit der Rauheitsform und -dichte sowie der Standardabweichung der Rauheitserhebungen, teilweise deutlich oberhalb der absoluten Rauheitshöhe k . Aus der Literatur entnommene Werte der relativen Höhe der Rauheitsschicht z_R/k für verschiedene Rauheitsarten sind in Tab. 3.1 zusammengestellt.

Mit der Definition, dass die Rauheitsschicht in Höhe der maximalen relativen Turbulenzintensität $(\sigma_u/u^*)_{\max}$ beginnt, zeigt sich deutlich der Einfluss der relativen Überdeckung auf den von der Rauheitsschicht eingenommenen Bereich (Abb. 3.6). Der Anteil der Rauheitsschicht an

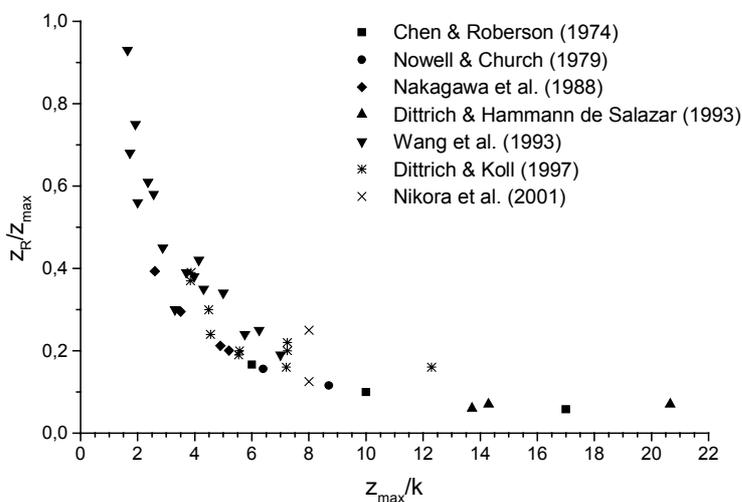


Abb. 3.6 Änderung des Anteils der Rauheitsschicht am Geschwindigkeitsfeld z_R/z_{\max} mit der relativen Überdeckung z_{\max}/k (hier: z_R = Höhe von $(\sigma_u/u^*)_{\max}$)

der gesamten Wassertiefe z_{\max} (gemessen ab Rauheitsunterkante, siehe Abb. 3.2) steigt mit abnehmender relativer Überdeckung z_{\max}/k und nimmt bei $z_{\max}/k \approx 1,5$ etwa 90 % des Geschwindigkeitsfeldes ein. Laut BAYAZIT (1982) erstreckt sich der Rauheitsbereich bereits ab einer relativen Überdeckung von $z_{\max}/k \lesssim 5$ bis an die Wasseroberfläche, wobei jedoch zu beachten ist, dass er zum einen keine lineare, sondern eine logarithmische Geschwindigkeitsverteilung mit

veränderter von Kármán Konstante κ in der Rauheitsschicht annahm. Zum anderen setzte er die Gültigkeit einer konstanten Sohlenschubspannungsverteilung mit $\tau_0/\rho = u_*^2$ über die ganze Wassertiefe voraus.

Tab. 3.1 Zusammenstellung von in der Literatur angegebenen Werten für das Verhältnis der Höhe der Rauheitsschicht z_R zur absoluten Rauheitshöhe k

Autor	Rauheitsart	z_R/k
Chen & Roberson (1974)	Halbkugeln im Rohr	≈ 1
Nikora et al. (2001, 2002a)	Halbkugeln	1
Nakagawa et al. (1988)	Glaskugeln	1,04
Nakagawa et al. (1991)	Glaskugeln	1,2 - 1,4
Dittrich et al. (1996)	Glaskugeln und Würfel	1,1 - 1,5
O'Loughlin & Annambhotla (1969)	Würfel	$\approx 1 - 2$
Nowell & Church (1979)	Legosteine	$\approx 1 - 2$
Bayazit (1982)	Dreiecke	$z_{\max}/k \leq 5: z_{\max}/k$ $z_{\max}/k \geq 5: \leq 4$
Nikora & McLean (2001)	stilisierte Dünen	1,2 - 1,4
Tsujimoto (1991)	Kies	1,3 - 2,2
Nikora & Smart (1997)	Kies	< 3
Raupach et al. (1991)	Vegetation im Windkanal	2 - 5

DITTRICH ET AL. (1996) berichteten von einer weiteren Unterteilung des Geschwindigkeitsprofils innerhalb der Rauheitsschicht, die bereits von BAYAZIT (1982) erwähnt, aber nicht weiter diskutiert wurde. Demnach besteht die Rauheitsschicht aus zwei Unterschichten (vgl. Abb. 3.1), wobei im weiteren die obere Schicht die erste und die untere die zweite forminduzierte Unterschicht genannt werden. Die meisten Untersuchungen zur Rauheitsschicht enden aus messtechnischen Gründen an der Oberkante der Rauheitselemente oder wurden für isolierte Rauheiten (vgl. Kap.3.2.3.1) durchgeführt, so dass für die zweite forminduzierte Unterschicht keine näheren Angaben in der Literatur zu finden sind. In einem ersten Ansatz wird deshalb DITTRICH ET AL. (1996) folgend der Verlauf des Geschwindigkeitsprofils in diesem Bereich ebenfalls als linear angenommen. Der Einfluss der viskosen Grenzschicht wird vernachlässigt und die Wirbelviskosität ν_{R2} analog zur Wirbelviskosität ν_R gleich dem Produkt aus der Mischungsweglänge l_{R2} und der Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit u_* gesetzt.

Getrennt nach den beiden forminduzierten Unterschichten sowie unter den Voraussetzungen, dass die Viskosität des Fluids vernachlässigbar und die Schubspannung konstant ist und dass die verschiedenen Schichten des wandnahen Strömungsfeldes sich nicht gegenseitig beeinflussen, lautet Gl. (3.7) nach Integration für die *zweite forminduzierte Unterschicht*

$$\frac{\bar{u}(z)}{u_*} = \frac{z}{l_{R2}} + \text{const}$$

und für die *erste forminduzierte Unterschicht*

$$\frac{\bar{u}(z)}{u_*} = \frac{z}{l_R} + \text{const}.$$

Hierbei wurde, wie gesagt, die turbulente Viskosität ν_T durch die rauheitsinduzierte Wirbelviskosität $\nu_{R2} = l_{R2} \cdot u_*$ resp. $\nu_R = l_R \cdot u_*$ ersetzt. RAUPACH ET AL. (1991) schlugen für die Berechnung der Mischungsweglänge in der Rauheitsschicht

$$l_R = \kappa \cdot (z_R - d)$$

vor, wobei κ die von Kármán Konstante und d der vertikale Versatz ist. Die mit diesen Parametern verbundenen Probleme werden ausführlich in Kap. 3.2.4 diskutiert.

Die Integrationskonstanten können jeweils mit Hilfe der oberen oder unteren Grenze des entsprechenden Bereichs bestimmt werden. Aufgrund der Linearität der Geschwindigkeitsprofile besteht zur Ermittlung der Konstanten theoretisch die Möglichkeit der Verwendung der Haftbedingung, d.h. $\bar{u}(z=0) = 0$. Dies muss jedoch aus zwei Gründen verworfen werden: zum einen ist es unter natürlichen Verhältnissen, d.h. bei einer mehrschichtigen Sohle, schwierig einen einheitlichen Koordinatenursprung $z = 0$ zu definieren und zum anderen ist die Geschwindigkeit zwischen Rauheitselementen selbst über festen Sohlen ungleich Null (DITTRICH & KOLL, 1997).

Mit der Randbedingung an der jeweiligen oberen Grenze der Unterschicht lautet die Integrationskonstante für die zweite forminduzierte Unterschicht ($\bar{u}(z = z_{R2}) = u_{R2}$)

$$\text{const} = \frac{u_{R2}}{u_*} - \frac{z_{R2}}{l_{R2}}$$

und für die erste forminduzierte Unterschicht ($\bar{u}(z = z_R) = u_R$)

$$\text{const} = \frac{u_R}{u_*} - \frac{z_R}{l_R}.$$

Damit ergeben sich folgende Gleichungen zur Berechnung der Geschwindigkeit in der zweiten resp. der ersten forminduzierten Unterschicht:

$$\frac{\bar{u}(z)}{u_*} = \frac{z - z_{R2}}{l_{R2}} + \frac{u_{R2}}{u_*} \quad (3.11)$$

$$\frac{\bar{u}(z)}{u_*} = \frac{z - z_R}{l_R} + \frac{u_R}{u_*}. \quad (3.12)$$

Neben der absoluten Rauheitshöhe k ist die Dichte der Elemente ein wesentliches Charakteristikum der Rauheit einer Sohle, weshalb dieser Parameter im folgenden Abschnitt vorgestellt wird.

3.2.3.1 Rauheitsdichte c_K

Untersuchungen von MORRIS (1955) zeigten, dass sich die Rauheitswirkung einer Sohle mit zunehmender Dichte der Elemente von isolierter Rauheit über Anordnungen, die zu einer Wirbelüberlagerungsströmung führen, bis hin zu quasi glatten Sohlen (Abb. 3.7) ändert.

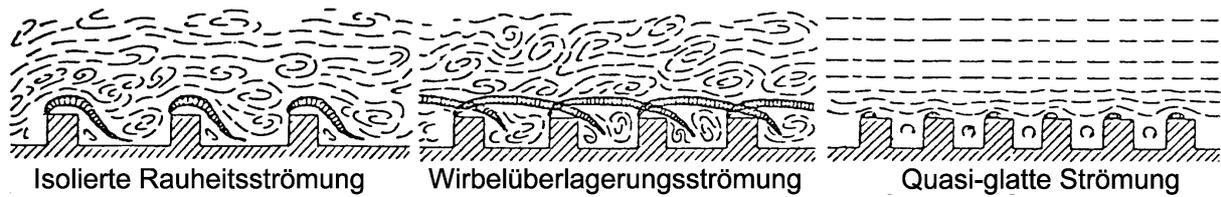


Abb. 3.7 Mögliche Strömungsarten über rauen Sohlen nach MORRIS (1955) (aus DITTRICH, 1998)

Basierend auf Untersuchungen mit künstlichen Rauheitselementen wurde zur Beschreibung der Rauheitsdichte und damit der Wirkung der Rauheit auf das Strömungsfeld der Faktor c_K eingeführt, der das Verhältnis der angeströmten Fläche A_{\perp} zur Grundfläche eines Rauheitselements A_G darstellt (Abb. 3.8), so dass mit zunehmendem c_K -Wert die Dichte der Elemente steigt:

$$c_K = \frac{A_{\perp}}{A_G}$$

Für natürliche Rauheiten ist die Bestimmung von A_{\perp} und A_G nur sehr ungenau, weshalb hierfür das Verhältnis der mittleren Rauheitshöhe z_{bm} zur absoluten Rauheitshöhe k als Maß für die Rauheitsdichte verwendet wird:

$$c_K' = \frac{z_{bm}}{k}$$

z_{bm} ist die von SCHLICHTING (1936) eingeführte mittlere Höhe der „eingeschmolzenen“ Rauheitselemente und lässt sich vereinfacht nach

$$z_{bm} = \frac{k \cdot L_E}{L}$$

berechnen, wobei L_E die Länge eines Rauheitselements und L der Abstand von einem Element zum nächsten ist (siehe Abb. 3.8). Da L_E/L ein Maß für die Rauheitsdichte ist, eignet sich auch z_{bm}/k als solches.

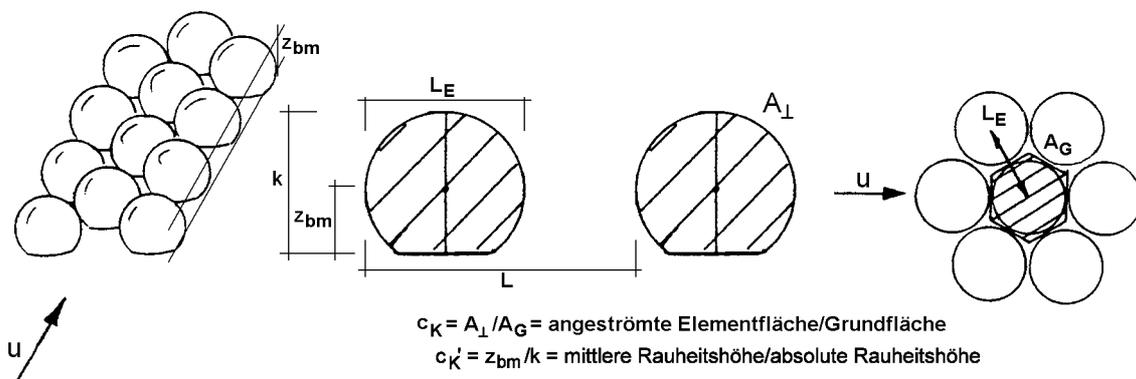


Abb. 3.8 Definitionsskizze der Rauheitsdichten c_K und c_K' (nach DITTRICH, 1998; modifiziert)

In atmosphärischen Untersuchungen ist die Einteilung einer rauen Sohle entsprechend ihrer Wirkung in d- und k-Rauheiten üblich (RAUPACH ET AL., 1991). Hierbei steht d für depth (= Tiefe), da die Wirbelgröße der Strömung von der Tiefe dominiert wird. Die d-Rauheit ent-

spricht einer quasi-glatten Sohle. Die Rauheitselemente sind so dicht angeordnet, dass die Wirbel innerhalb der forminduzierten Unterschicht verbleiben und somit den logarithmischen Bereich nicht beeinflussen.

Die k-Rauheit entspricht der Wirbelüberlagerungsströmung und der Strömung über isolierten Rauheiten, wobei k die absolute Höhe der Rauheitselemente bezeichnet. Aufgrund der größeren Abstände der Rauheitselemente voneinander kann der logarithmische Geschwindigkeitsbereich durch sich von der Oberkante ablösende Wirbel beeinflusst werden.

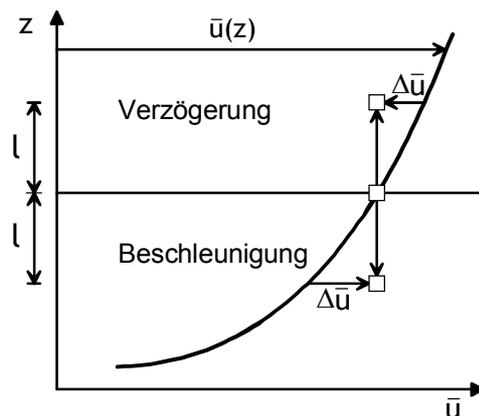
3.2.4 Logarithmische Schicht

In dem Bereich oberhalb der Rauheitsschicht kann die Wirbelviskosität und damit die Mischungsweglänge nicht mehr als konstant angenommen werden, sondern ist mit der vertikalen Koordinate z veränderlich. Die turbulente Schubspannung $\tau_T = -\rho \cdot \overline{u'w'} = \rho \cdot \nu_T \cdot d\bar{u}/dz$ kann entweder direkt aus der Messung der turbulenten Schwankungen in Hauptströmungsrichtung und normal zur Sohle bestimmt werden oder mit Hilfe des Prandtl'schen Mischungswegkonzepts. Die turbulente Viskosität setzt sich jetzt aus der rauheitsinduzierten Wirbelviskosität und der Wirbelviskosität des logarithmischen Bereichs zusammen:

$$\nu_T = \nu_R + \nu_L \cdot$$

Da in der Literatur im logarithmischen Bereich nicht zwischen ν_R und ν_L unterschieden wird, erfolgt die Herleitung des logarithmischen Geschwindigkeitsprofils unter Verwendung von ν_T .

PRANDTL (1933) erläuterte die turbulenten Vorgänge in Anlehnung an den molekularen Massentransport, wonach durch den ständigen Austausch von Bewegungsgrößen zwischen Schichten unterschiedlicher Geschwindigkeit scheinbare Schubspannungen entstehen. Die Zähigkeitseinflüsse des Fluids müssen hierfür vernachlässigbar sein. Der Geschwindigkeitsunterschied Δu zweier um die Länge l auseinanderliegender Schichten beträgt



$$\Delta u = l \cdot \frac{d\bar{u}}{dz}$$

und ist ein Maß für die Schwankungsgeschwindigkeiten, so dass folgt:

$$u' \propto l_u \cdot \frac{d\bar{u}}{dz} \quad \text{und} \quad w' \propto l_w \cdot \frac{d\bar{u}}{dz},$$

wobei l_u und l_w die Mischungsweglängen in x- und z-Richtung sind.

Abb. 3.9 Erläuterungsskizze zur Mischungsweglänge (nach SCHLICHTING & GERSTEN, 1997)

Unter der Annahme isotroper Turbulenz der Strömung, d.h. die physikalischen und chemischen Eigenschaften sind in alle Richtungen gleich, setzte PRANDTL (1933) die Mischungsweglängen l_u und l_w gleich, so dass für die turbulente Schubspannung gilt:

$$\frac{\tau_T}{\rho} = -\overline{u'w'} = \nu_T \cdot \frac{d\bar{u}}{dz} = l_u \cdot \frac{d\bar{u}}{dz} \cdot l_w \cdot \frac{d\bar{u}}{dz} = \left(l \cdot \frac{d\bar{u}}{dz} \right)^2,$$

wobei die Wirbelviskosität $\nu_T = l^2 \cdot \left| \frac{d\bar{u}}{dz} \right|$ ist.

Das Prandtl'sche Mischungswegkonzept setzt, wie gesagt, in erster Näherung die Isotropie der Turbulenz voraus, die streng genommen über rauen Sohlen nicht gegeben ist. Neueren Untersuchungen im Windkanal zufolge ist allerdings die Anisotropie turbulenter Bewegungen über drei-dimensionalen Rauheiten sogar geringer als über zwei-dimensionalen Rauheiten und glatten Sohlen (ANTONIA & KROGSTAD, 2001). Aufgrund der Anisotropie wird in einem modifizierten Ansatz die Schwankung der vertikalen Geschwindigkeitskomponente w' als konstant angenommen und nur die Schwankung der horizontalen Geschwindigkeitskomponente u' als Variable von z beibehalten. Aufgrund zahlreicher Messungen kann w' mit guter Näherung gleich der Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit u_* gesetzt werden:

$$u' \propto l_u(z) \cdot \frac{d\bar{u}}{dz} \quad \text{und} \quad w' = u_*.$$

Die turbulente Schubspannung berechnet sich nach:

$$\frac{\tau_T}{\rho} = -\overline{u'w'} = \nu_T \cdot \frac{d\bar{u}}{dz} = l_u(z) \cdot \frac{d\bar{u}}{dz} \cdot l_w \cdot \frac{d\bar{u}}{dz} = l_u(z) \cdot \frac{d\bar{u}}{dz} \cdot u_*,$$

wobei die Wirbelviskosität jetzt $\nu_T = l_u(z) \cdot u_*$ ist.

Die unbekannte Wirbelviskosität ν_T wurde durch die ebenfalls unbekannte Mischungsweglänge $l_u(z)$ ersetzt, die nach PRANDTL (1933) proportional der vertikalen Koordinate z ist. Als Proportionalitätskonstante schlug PRANDTL (1933) die von Kármán Konstante κ vor, auf die in Kap. 3.2.4.3 näher eingegangen wird:

$$l_u(z) = \kappa \cdot z \quad (3.13a)$$

bzw. über rauen Sohlen

$$l_u(z) = \kappa \cdot (z - d), \quad (3.13b)$$

wobei d der Versatz des Bezugsniveaus für das logarithmische Geschwindigkeitsprofil, hier ausgehend von der Rauheitsunterkante, ist (siehe Abb. 3.2 und Kap. 3.2.4.2).

Mit der Annahme, dass die Schubspannung weiterhin konstant ist, d.h. der Term $(1-z/h)$ wird vernachlässigt, und unter Vernachlässigung der kinematischen Zähigkeit des Wassers gegenüber der Turbulenz der Strömung lautet Gl. (3.7)

$$\frac{\tau_0}{\rho} = u_*^2 = \frac{\tau_T}{\rho} = \nu_T \cdot \frac{d\bar{u}}{dz} = l_u(z) \cdot u_* \cdot \frac{d\bar{u}}{dz} = \kappa \cdot (z - d) \cdot u_* \cdot \frac{d\bar{u}}{dz}.$$

Für glatte Sohlen, d.h. $d = 0$, liefert die Integration das *logarithmische Wandgesetz*:

$$\frac{\bar{u}(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln(z) + \text{const.} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z}{\delta_v}\right) + \frac{u_\delta}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{u_* \cdot z}{v}\right) + A. \quad (3.14)$$

Die Integrationskonstante A wurde aus der Bedingung bestimmt, dass am Übergang von Grenzschicht zu logarithmischer Schicht in der Tiefe $z = \delta_v$ die Geschwindigkeit $u(z=\delta_v) = u_\delta$ vorliegt. Die Existenz des Übergangsbereichs wurde hierbei vernachlässigt.

Die Konstanten A und κ wurden von NIKURADSE (1933) anhand von Versuchen in einem Rohr ermittelt, dessen Innenwand gleichmäßig mit Sandkörnern der Größe k_S beklebt worden war. Zunächst verallgemeinerte er das logarithmische Wandgesetz zu

$$\frac{\bar{u}(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z}{k_S}\right) + B, \quad (3.15)$$

so dass es für glatte und raue Sohlen anwendbar wurde, und unterschied dann in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl der Strömung die drei Bereiche laminar, Übergang und voll turbulent. Auf die Parameter B, k_S und κ wird in Kap. 3.2.4.1 und 3.2.4.3 näher eingegangen. Heute wird Gl. (3.15) mit $\kappa = 0,4$ und $B = 8,5$ (im hydraulisch rauen Bereich) als *logarithmisches Wandgesetz nach NIKURADSE* bezeichnet.

Die Voraussetzung der konstanten Schubspannung begrenzt die Gültigkeit der Gln. (3.14) und (3.15) auf den wandnahen Bereich, der in der Literatur mit $z/h \leq 0,15 \div 0,2$ angegeben wird, wobei aber eine Ausdehnung bis 60 % der Wassertiefe möglich ist (siehe NEZU & RODI, 1986).

Wie oben erwähnt, wurde ν_T zur Herleitung der Gleichungen verwendet und nicht zwischen der Rauheitsinduzierten und der logarithmischen Wirbelviskosität unterschieden. Inwieweit die Rauheitsschicht zu berücksichtigende Auswirkungen auf den logarithmischen Bereich hat, könnte von der Dichte der Rauheitselemente abhängen. Es ergeben sich folglich zwei Optionen für die Berechnung der Geschwindigkeit über rauen Sohlen im logarithmischen Bereich, d.h. ν_L wird nach Gl. (3.13b) berechnet:

Option 1:

Die Auswirkungen der Rauheitsschicht auf den logarithmischen Bereich, d.h. die rauheitsinduzierte Wirbelviskosität ν_R kann vernachlässigt werden (quasi-glatte Sohlen):

$$\frac{\tau_0}{\rho} = \nu_L \cdot \frac{d\bar{u}}{dz} = \kappa \cdot (z - d) \cdot u_* \cdot \frac{d\bar{u}}{dz} = u_*^2$$

und

$$\frac{\bar{u}(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln(z - d) + \text{const.}$$

Option 2:

Die Auswirkung der Rauheitsunterschicht auf den logarithmischen Bereich, d.h. ν_R , muss berücksichtigt werden (Wirbelüberlagerung und isolierte Rauheit):

$$\frac{\tau_0}{\rho} = (\nu_R + \nu_L) \cdot \frac{d\bar{u}}{dz} = (l_R \cdot u_* + l_L(z) \cdot u_*) \cdot \frac{d\bar{u}}{dz} = (l_R + \kappa \cdot (z - d)) \cdot u_* \cdot \frac{d\bar{u}}{dz} = u_*^2$$

und

$$\frac{\bar{u}(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln (l_R + \kappa \cdot (z - d)) + \text{const.}$$

Die Konstanten können wiederum aus der Bedingung $u(z=z_R) = u_R$ bestimmt werden, so dass für

$$\text{Option 1:} \quad \text{const} = \frac{u_R}{u_*} - \frac{1}{\kappa} \cdot \ln (z_R - d)$$

und für

$$\text{Option 2:} \quad \text{const} = \frac{u_R}{u_*} - \frac{1}{\kappa} \cdot \ln (l_R + \kappa \cdot (z_R - d))$$

folgt. Die Gleichungen zur Berechnung der Geschwindigkeitsverteilung lauten damit:

$$\text{Option 1:} \quad \frac{\bar{u}(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln \left(\frac{z - d}{z_R - d} \right) + \frac{u_R}{u_*}, \quad d \neq z_R \quad (3.16a)$$

$$\text{Option 2:} \quad \frac{\bar{u}(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln \left(\frac{l_R + \kappa \cdot (z - d)}{l_R + \kappa \cdot (z_R - d)} \right) + \frac{u_R}{u_*}. \quad (3.16b)$$

3.2.4.1 Integrationskonstante B und äquivalente Sandrauheit k_S

Wie oben erwähnt führte NIKURADSE (1933) zur Herleitung von Gl. (3.15) Versuche in einem mit Sandkörnern beklebten Rohr durch und ersetzte die Dicke der viskosen Grenzschicht δ_v durch den Durchmesser der Sandkörner k_S . Die Integrationskonstante A, die über glatten Sohlen, abhängig von δ_v (Gl. 3.10), Werte zwischen 5 und 5,5 annimmt, wurde modifiziert und NIKURADSE unterschied in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl der Strömung die drei Bereiche laminar, Übergang und voll turbulent. Demzufolge ist die Konstante B in den Bereichen I und II (laminar und Übergang) eine Funktion der Korn-Reynolds-Zahl $Re_* = \frac{u_* \cdot k_S}{\nu}$. Im Bereich III (voll turbulent) hingegen ist sie unabhängig von Re_* und nimmt den Wert 8,48 an. SCHLICHTING (1982) trug B als Funktion der Korn-Reynolds-Zahl Re_* auf (Abb. 3.10), wonach bzgl. der hydraulischen Wirkung der Sohlenrauheit ebenfalls drei Bereiche unterschieden werden:

$$\text{Bereich I:} \quad \text{hydraulisch glatte Sohle} \quad Re_* \leq 5 \quad B = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln \left(\frac{u_* \cdot k_S}{\nu} \right) + 5,5$$

$$\text{Bereich II:} \quad \text{Übergangsbereich} \quad 5 \leq Re_* \leq 70 \quad \text{Verlauf siehe Abb. 3.10}$$

$$\text{Bereich III:} \quad \text{vollkommen raue Sohle} \quad Re_* \geq 70 \quad B = 8,5$$

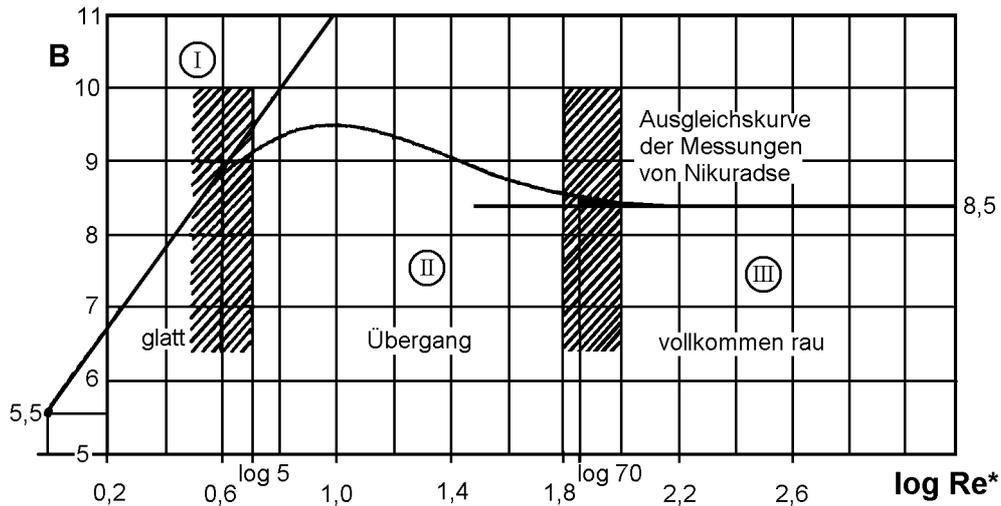


Abb. 3.10 Abhängigkeit der Konstanten B von Re^* nach SCHLICHTING (1982) (aus DITTRICH, 1998; modifiziert)

Während der Parameter k_s zunächst die absolute Größe der von NIKURADSE verwendeten Sandkörner wiedergab, wird er heute als äquivalente Sandrauheit bezeichnet und ist ein Maß für die hydraulische Wirkung der Sohlenrauheit. Dabei wird der Wert von k_s aus der Bedingung bestimmt, dass bei vollkommen rauen Sohlen die Konstanten $\kappa = 0,4$ und $B = 8,5$ sind (siehe auch Abb. 3.15), weshalb etwa in der Höhe $z = k_s$ das gemessene Geschwindigkeitsprofil vom logarithmischen Profil abweicht (Abb. 3.11).

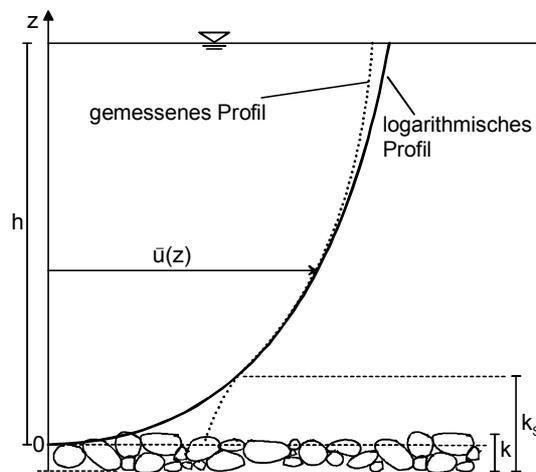


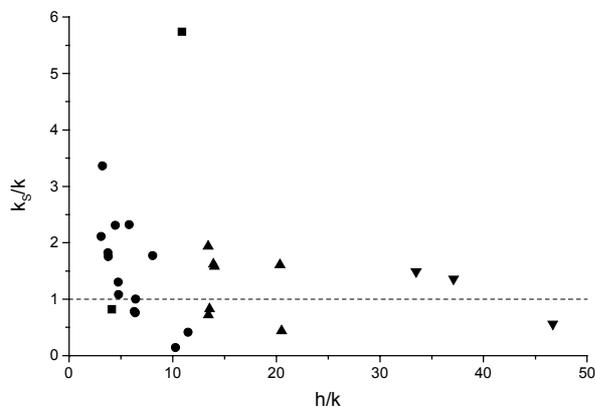
Abb. 3.11 Abweichung der gemessenen Geschwindigkeit vom logarithmischen Geschwindigkeitsprofil (nach DITTRICH, 1998)

Mit abnehmender relativer Überdeckung nimmt die äquivalente Sandrauheit zu und kann ein vielfaches der absoluten Rauheitshöhe k erreichen (Abb. 3.12). Beispielsweise ermittelten GRASS ET AL. (1991) aus Versuchen mit einer zweidimensionalen Streifenrauheit den Wert $k_s = 5,7 \cdot k$. Eine ausführliche Zusammenstellung weiterer Größen der äquivalenten Sandrauheit kann z.B. DITTRICH (1998) entnommen werden.

Über rauen Sohlen ist die Anpassung des logarithmischen Profils an die gemessenen Geschwindigkeiten häufig erst durch die Einführung des vertikalen Versatzes d (siehe Kap. 3.2.4.2) möglich, da erst mit der Verschiebung des Nullniveaus die von Kármán Konstante zu

0,4 gesetzt werden kann. Durch die daraus resultierende Drehung des Geschwindigkeitsprofils können sich, unabhängig von der relativen Überdeckung, k_S -Werte ergeben, die sogar niedriger als die Rauheitshöhe k sind (Abb. 3.12). Ergebnisse mit $k_S/k < 1$ sind physikalisch nicht sinnvoll, da das logarithmische Geschwindigkeitsprofil dann bis unterhalb der Rauheitsoberkante gültig wäre. Diese Möglichkeit schlossen NAKAGAWA ET AL. (1991) jedoch aufgrund der mit der Abnahme der Reynoldsschubspannung einhergehenden Änderung des Geschwindigkeitsprofils aus (vgl. Kap. 3.2.3).

Andererseits kann der ermittelte k_S -Wert auch so hoch sein, dass die Abweichung des logarithmischen Geschwindigkeitsprofils von den gemessenen Daten bereits oberhalb des Gültigkeitsbereichs von Gl. (3.15) liegt. Dies verdeutlicht die Auftragung des Verhältnisses von k_S zur oberen Grenze der logarithmischen Schicht $z_L = 0,2 \cdot h$ als Funktion der relativen Überdeckung in Abb. 3.13. Zur Erläuterung der vertikalen Abmessungen siehe Abb. 3.2. Etwa ab $h/k < 5$ ist die äquivalente Sandrauheit größer als z_L . Vermutlich aus diesem Widerspruch resultiert die Annahme, dass bei geringen relativen Überdeckungen eine logarithmische Schicht nicht mehr vorhanden ist (z.B. laut BAYAZIT (1982) ab $z_{max}/k \leq 5$). Abb. 3.14 zeigt jedoch, beispielsweise für $z_{max}/k = 3,85$, einen eindeutig logarithmischen Verlauf des Geschwindigkeitsprofils auch bei geringen relativen Überdeckungen. Der Determinationskoeffizient weist mit $R^2 = 0,991$ eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung (DITTRICH & KOLL, 1997) und Regression auf. Die gegenüber großen relativen Überdeckungen abweichende Steigung des Geschwindigkeitsprofils (in Abb. 3.14 ist $1/\kappa = 4,96$ statt 2,5) wird in Kap. 3.2.4.3 diskutiert.



■ Grass et al. (1991) ▲ Dittrich & Hammann de Salazar (1993) ● Dittrich & Koll (1997) ▼ Nikora & Goring (2000)

Abb. 3.12 Abhängigkeit des Verhältnisses k_S/k von der relativen Überdeckung

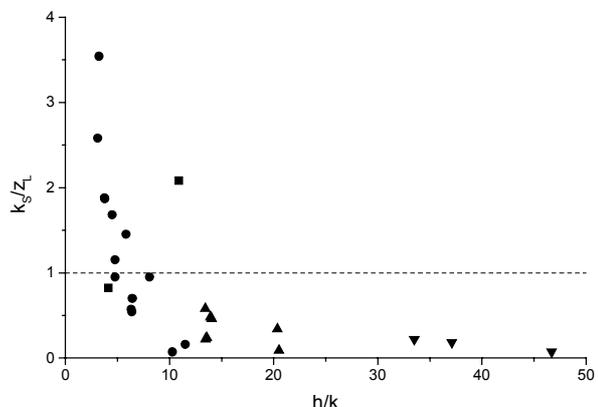


Abb. 3.13 Abhängigkeit des Verhältnisses k_S/z_L von der relativen Überdeckung

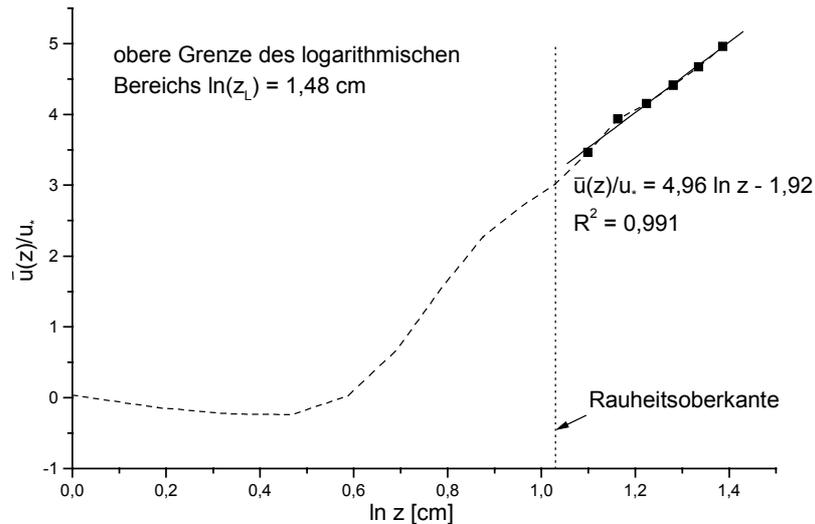


Abb. 3.14 Geschwindigkeitsprofil bei $z_{max}/k = 3,85$ (nach DITTRICH & KOLL, 1997)

Aufgrund der genannten Schwierigkeiten wird die äquivalente Sandrauheit häufig gleich der absoluten Rauheitshöhe k gesetzt und die Integrationskonstante B angepasst (NIKORA ET AL., 2001).

Die notwendigen Veränderungen weisen bereits darauf hin, dass das ursprüngliche logarithmische Wandgesetz nach Gl. (3.14) auch durch die Modifikation nach NIKURADSE (Gl. 3.15) nicht uneingeschränkt für raue Sohlen gültig ist.

3.2.4.2 Vertikaler Versatz d

Die Untersuchung rauer Sohlen wirft die Frage nach einer einheitlichen Bezugsebene, d.h. nach dem Ursprung der vertikalen Koordinate z , auf. Im Labor kann bei einlagigen Rauheiten der Rinnenboden verwendet werden, was allerdings bereits bei mehrlagigen Sohlen sowie in der Natur nicht mehr möglich ist. Die Rauheitsoberkante scheint also die geeignetere Wahl zu sein. Hier bereitet jedoch die Unebenheit der Oberkante bei Verwendung natürlicher Rauheitselemente, sprich Kies, vor allem bei der Untersuchung von Kornmischungen Probleme.

SCHLICHTING (1936) schlug diejenige Höhe vor, die das gleichmäßig über die Rinnenfläche verteilte Volumen aller Rauheitselemente erreichen würde, so als ob die Rauheit eingeschmolzen und anschließend ausgegossen wird. Sie wird mit z_{bm} bezeichnet (vgl. Abb. 3.2).

O'LOUGHLIN & ANNAMBHOTLA (1969) erklärten die Bedeutung des Bezugsniveaus damit, dass die Unabhängigkeit des Strömungsfeldes von der Zähigkeit des Fluids gewährleistet sein muss und wählten deshalb die obere Grenze der viskosen Schicht. Diese Schicht wird jedoch bei zunehmender Rauheit verschwindend gering und ist bei mehrlagigem Sohlenaufbau höchstwahrscheinlich nicht mehr vorhanden (ROTTA, 1950).

Weiterhin zeigte sich, dass die Geschwindigkeit in Höhe der Rauheitsoberkante nicht Null ist, so dass die Haftbedingung $u(z=0) = 0$ nicht mehr erfüllt ist. Deshalb wurde unter Voraussetzung der Gültigkeit von Gl. (3.15) als Ursprung der vertikalen Koordinate der Nulldurchgang des theoretischen Geschwindigkeitsprofils nach NIKURADSE (1933) definiert. Die Bestimmung

des vertikalen Versatzes d erfolgt häufig mit der von CLAUSER (1956) eingeführten Methode (Abb. 3.15), wonach zunächst eine Regressionsgerade durch die in halblogarithmischer Darstellung aufgetragenen Messwerte $u = f(\ln z)$ gelegt wird. Durch Optimierung des Regressionskoeffizienten wird der auszuwertende Bereich festgelegt. Iterativ wird gleichzeitig der Wert d so bestimmt, dass die Steigung $m = 1/\kappa$ der Regressionsgeraden den Wert $1/0,4 = 2,5$ annimmt. Aus dem y-Achsenabschnitt b wird dann die äquivalente Sandrauheit unter der Annahme berechnet, dass die Integrationskonstante $B = 8,5$ ist.

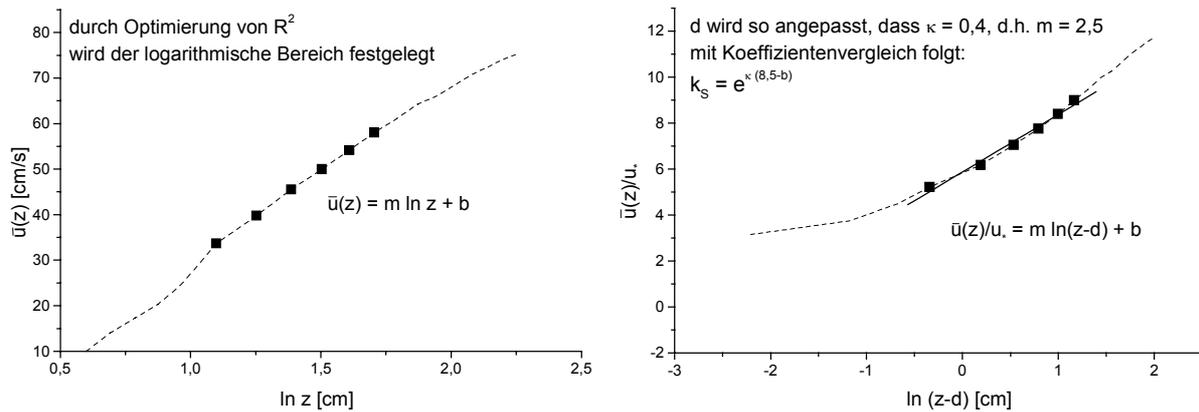


Abb. 3.15 Bestimmung des vertikalen Versatzes und der äquivalenten Sandrauheit nach der Methode von CLAUSER (1956)

NOWELL & CHURCH (1979) bezweifelten diese Methode, da sie neben anderen Problemen zu einer willkürlichen Bestimmung und Größe der Rauheitslänge k_s führt (vgl. Kap. 3.2.4.1). Unter „anderen Problemen“ ist z.B. das Auftreten von Werten für d , die größer als die absolute Rauheitshöhe k sind, zu verstehen, wie z.B. der von Nikora & Goring (2000) bestimmte Wert von $d/k = 2,27$ (Abb. 3.16). Der Nulldurchgang des theoretischen Geschwindigkeitsprofils liegt dann oberhalb der Rauheitselemente, was physikalisch nicht erklärbar ist.

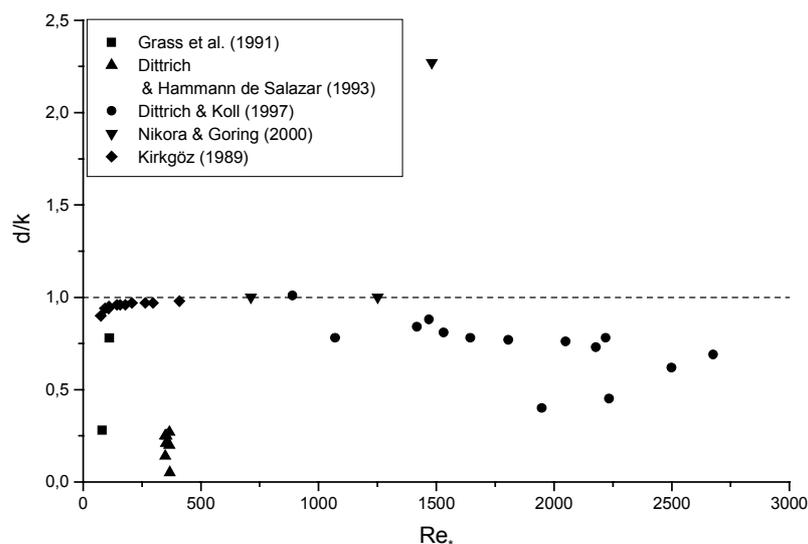


Abb. 3.16 d/k als Funktion von Re

Die Bezugsebene des logarithmischen Bereichs nähert sich KIRKGÖZ (1989) zufolge mit zunehmendem Re_* der Rauheitsoberkante, anstatt immer tiefer zwischen den Rauheitselementen zu liegen, wie zu erwarten wäre und aus den Ergebnissen von DITTRICH & KOLL (1997) ersichtlich ist. Den vertikalen Versatz bestimmte KIRKGÖZ (1989) ausgehend von der Rauheitsoberkante (Kies mit effektiven Rauheitshöhen $k = 1, 4, 8$ und 12 mm) aus dem y -Achsenabschnitt durch scheinbar willkürliche Verlängerung des Geschwindigkeitsprofils. Anschließend berechnete er die Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit unter der Annahme einer laminaren Strömung zwischen den Rauheitselementen (vgl. Kap. 3.2.4.4). Leider können die Daten nicht reanalysiert werden, da die Sohlen- bzw. Wasserspiegelneigungen zur erneuten Berechnung der Sohlenschubspannungsgeschwindigkeiten nach Gl. (3.5) nicht veröffentlicht wurden.

Das Problem fehlender Angaben zieht sich durch die gesamte Literatur, weshalb nur wenige Ergebnisse verschiedener Autoren direkt mit einander verglichen werden können. Trotzdem kann aus dem Vergleich der bei DITTRICH (1998) zusammengestellten Größenordnung des vertikalen Versatzes ($d = 0,13 \div 0,833 \cdot k$) mit den Werten von ROTTA (1950) ($d = 0,035 \cdot k$) und KIRKGÖZ (1989) ($d = 0,02 \div 0,09 \cdot k$) geschlossen werden, dass die von diesen Autoren verwendete Methode zu einem etwa um den Faktor 10 zu niedrigen Versatz d führt.

Die Lage des Bezugsniveaus wird im allgemeinen als alleinige Funktion der Rauheit angesehen, weshalb meistens genau ein Wert für das Verhältnis d/k einer Rauheit angegeben wird. RAUPACH ET AL. (1991) sowie Abb. 3.16 zufolge ist die Größe des vertikalen Versatzes jedoch auch eine Funktion der Strömung.

3.2.4.3 von Kármán Konstante κ

PRANDTL (1933) nahm zur Berechnung des logarithmischen Geschwindigkeitsprofils eine lineare Änderung der Mischungsweglänge mit der Tiefe an und führte als Proportionalitätskonstante die von Kármán Konstante κ ein (Gl. 3.13), deren Wert VON KÁRMÁN (1930) mit 0,38 angab. In Versuchen über glatten Sohlen bzw. regelmäßigen, kleinen Rauheiten bei ausreichend großen relativen Überdeckungen wurde der Wert von NIKURADSE (1933) zu $\kappa \approx 0,4$ bestimmt und nachfolgend von vielen Autoren bestätigt (z.B. NEZU & RODI, 1986). Heute gilt der Parameter als universelle Konstante und sollte somit unabhängig von Fluid- und Strömungseigenschaften sowie geometrischen Randbedingungen sein.

Die Diskussion der Bedeutung einer konstanten Mischungsweglänge, d.h. einer universellen Konstanten κ , erfordert einen kurzen Überblick über den Aufbau des turbulenten Strömungsfeldes. In Visualisierungsversuchen über einer glatten Sohle konnten KLINE ET AL. (1967) mit Hilfe von Farbinjektion sowie der Injektion feiner Wasserstoffblasen zusammenhängende turbulente Strukturen in der Strömung nachweisen. Die bekannteste makroturbulente oder auch kohärente Struktur genannte Wirbelformation ist der Hufeisen- bzw. der weiterentwickelte Haarnadelwirbel (Abb. 3.17).

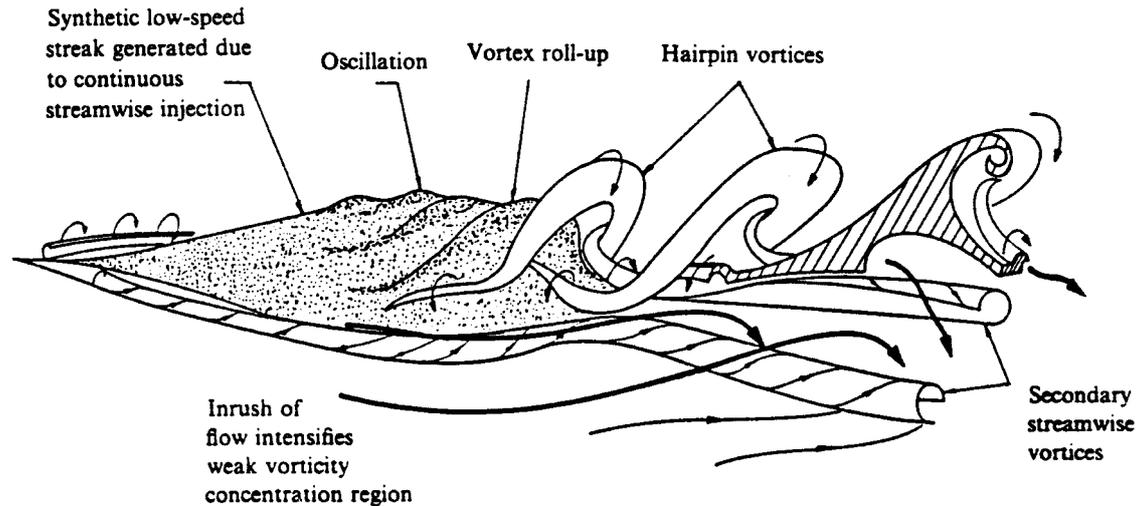


Abb. 3.17 Schematisierte Darstellung eines Haarnadelwirbels (aus: NEZU & NAKAGAWA, 1993a)

Die im folgenden beschriebene Entstehung von kohärenten Strukturen sowie ihr Aufbrechen ist in Abb. 3.18 dargestellt. In der viskosen Grenzschicht über einer glatten Sohle entstehen in einer Art Selbstorganisation in Hauptströmungsrichtung verlaufende Wirbelstreifen mit entgegengesetzten Drehrichtungen. Die Wirbel transportieren Fluid höherer Geschwindigkeit zur Sohle hin bzw. Fluid geringerer Geschwindigkeit nach oben. Bereiche mit geringerer Geschwindigkeit als ihre Umgebung sind unter dem Namen low-speed streaks bekannt. Sie wechseln sich mit Bereichen höherer Geschwindigkeit (high-speed streaks) ab (vgl. Abb. 3.18). Die oberhalb der viskosen Grenzschicht befindlichen Wirbel der freien Strömung, die senkrecht zur Hauptströmung ausgerichtet sind, werden über den low-speed streaks in Form von aufwärtsgerichteten ejections ($u' < 0$ und $w' > 0$) in Bereiche höherer Fließgeschwindigkeit gehoben. Das wiederum hat eine Streckung dieser Wirbel zur Folge. Der Kopf des so entstandenen Haarnadelwirbels beginnt zu oszillieren und zerplatzt schließlich. Dies bewirkt die zur Sohle gerichteten sweeps ($u' > 0$, $w' < 0$), die Fluid höherer Geschwindigkeit in sohlennahe Regionen transportieren. Durch diese bursts (Abb. 3.18), wie die quasi-zyklische Abfolge von ejections und sweeps bezeichnet wird, zerfallen die großskaligen, kohärenten Strukturen entlang der Energiekaskade in kleinerkalige, hochfrequente Wirbel bis sie so klein sind, dass die turbulente kinetische Energie zu Wärme dissipiert (KLINE ET AL., 1967; BEST, 1993; KIRKBRIDE, 1993; NEZU & NAKAGAWA, 1993a).

Die Energiespektren werden mit Hilfe der Fouriertransformation der Autokorrelationen berechnet und als Funktion der Wellenzahl k_w aufgetragen. Die Wellenzahl dient dabei der Charakterisierung der Wirbelgröße, wobei eine kleinere Wellenzahl einen größeren Wirbel bedeutet. Das Ausmaß der größten, in Hauptströmungsrichtung drehenden Wirbel ($k_w = 0$) entspricht etwa der Wassertiefe, während ihre Längsausdehnung ein mehrfaches der Wassertiefe beträgt (NEZU & NAKAGAWA, 1993a). Die makroskaligen, kohärenten Strukturen, deren Entstehung maßgeblich auf die Existenz der low-speed streaks zurückgeführt wird (z.B. KLINE ET AL., 1967), sind demnach die Hauptenergieträger der Strömung und der Burstprozess ist die maßgebliche Quelle der turbulenten Energie. GRASS ET AL. (1991) zufolge liefert er den entscheidenden Anteil an den turbulenten Schubspannungen.

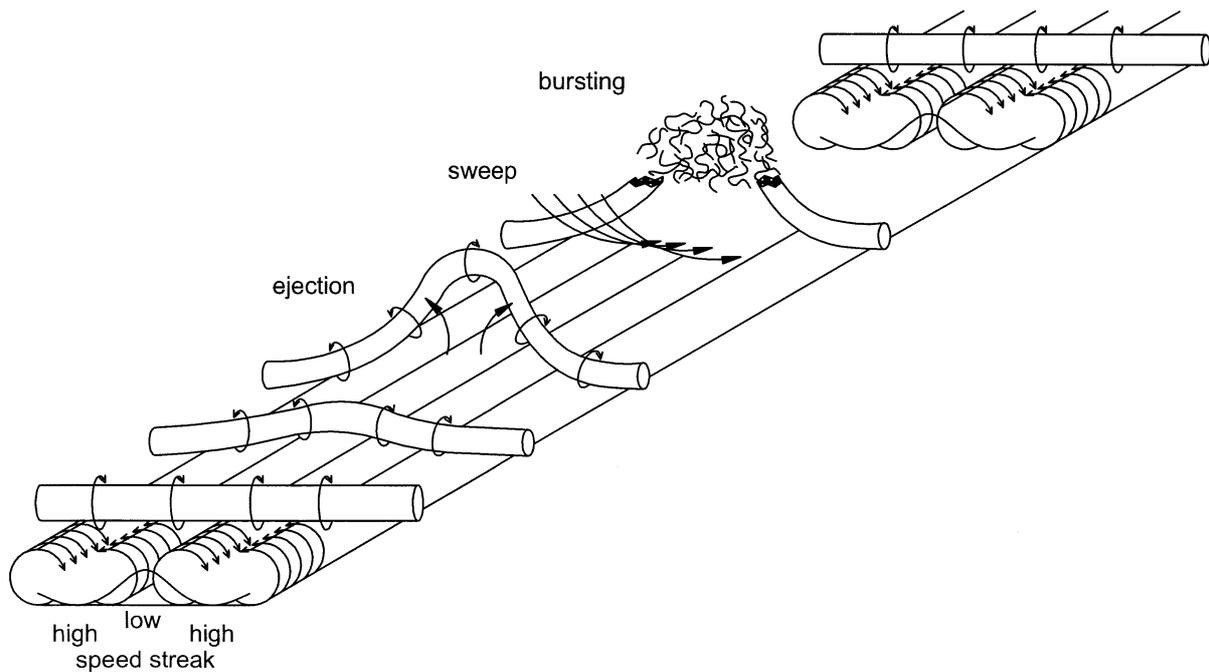


Abb. 3.18 Skizze zum Entstehen und Aufbrechen eines Haarnadelwirbels

Aufgrund der experimentell nachgewiesenen Existenz der gleichen kohärenten Strukturen über rauen Sohlen [GRASS, 1971, für Sand (2 mm) und Kies (9 mm); GRASS ET AL., 1991, für Glaskugeln (1,15; 6 und 12 mm) und Querstreifen (5 mm) in Wirbelüberlagerungsströmung; NEZU & NAKAGAWA, 1993b, für stilisierte Dünen; DJENIDI ET AL., 1999, für Querstreifen (5 mm) über quasi-glatte Sohle; SHVIDCHENKO & PENDER, 2001, für Kies (2,4; 4,5; 5,65 und 7,15 mm)] wird dieses Phänomen als typisch für turbulente Strömungen und als unabhängig von der Sohlenbeschaffenheit angesehen. Der Impulsaustausch scheint über glatten und rauen Sohlen den gleichen Gesetzmäßigkeiten zu folgen, was durch die Konstanz von κ ausgedrückt wird. Die einheitliche Steigung des Geschwindigkeitsprofils im logarithmischen Bereich bedeutet weiterhin, dass der berechnete Fließwiderstand mit dem gemessenen übereinstimmt, da κ auch in die Gleichung zur Berechnung des Widerstandsbeiwertes λ nach Darcy-Weisbach eingeht:

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda}} = \frac{u_m}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{h}{k_S}\right) + B - \frac{1}{\kappa},$$

wobei u_m die mittlere Fließgeschwindigkeit, h die Wassertiefe und B die Integrationskonstante ist. Wird z.B. eine höhere Geschwindigkeit im logarithmischen Bereich gemessen als berechnet, dann ist die Steigung des Geschwindigkeitsprofils größer, der tatsächliche Fließwiderstand geringer, damit die Mischungsweglänge und folglich κ kleiner als angenommen.

Die widerstandsreduzierende Wirkung kohäsiver Schwebstoffe, d.h. reduzierte Werte von κ , aufgrund der Erhöhung der kinematischen Viskosität des Fluids ist unumstritten. Bereits ab Schwebstoffkonzentrationen von mehr als ca. 8 % (WANG & LARSEN, 1994), ändern sich die Fluideigenschaften dahingehend, dass nicht länger ein Newton'sches Fluid vorliegt. WANG ET AL. (1998) erklärten die in Versuchen mit Klarwasser und Tonsuspension beobachtete Verringerung des Fließwiderstandes sowohl über glatten als auch über rauen Sohlen neben der

erhöhten Viskosität mit der Ausbildung von Flocken, die langkettigen Molekülen entsprechen. Aus Untersuchungen zur Wirkung von Polymeren, die einem zu transportierenden Fluid beigemischt werden, um den Fließwiderstand gezielt zu reduzieren, ist bekannt, dass die Größe der turbulenten Schwankungen in x-Richtung steigt und die vertikalen Fluktuationen sowie die Reynoldsspannungen abnehmen. Dies wird damit erklärt, dass die Burstprozesse zwar nicht in ihrer Stärke, aber in der Häufigkeit ihres Auftretens reduziert werden (KLINE ET AL., 1967; BEST, 1993). Die erhöhte Viskosität bewirkt eine Verschiebung des Energiespektrums hin zu den größeren Skalen und macht sich durch die zunehmende Entfernung der Orte der maximalen Turbulenzintensität σ_u sowie der maximalen Reynoldsspannung von der Sohle bemerkbar (HANDLER ET AL., 1993).

Für den Fall des kohäsionslosen Schwebstofftransports ist eine Reduktion von κ zwar nicht unumstritten, aber doch weitestgehend akzeptiert. VANONI & NOMICOS (1959) widerlegten die zu ihrer Zeit verbreitete Annahme einer durch Schwebstofftransport bedingten geringeren Fließgeschwindigkeit anhand von Laborversuchen, wobei glatte sowie mobile Sohlen und fixierte Transportkörper untersucht wurden. Sie führten die mit der Schwebstoffkonzentration zunehmende mittlere Geschwindigkeit und die damit verbundene Abnahme des Fließwiderstandes sowie der von Kármán Konstante auf die Dämpfung der Turbulenz der Strömung zurück, die z.B. von CELLINO & GRAF (1999) bestätigt wurde. Letztere untersuchten Sohlenrauheiten im Übergangsbereich von hydraulisch glatt zu vollkommen rau und glichen die bei zunehmender Schwebstoffkonzentration abnehmende Wassertiefe durch die Erhöhung des Durchflusses aus, so dass $\kappa = 0,4$ für alle Konzentrationen eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenem und berechnetem Geschwindigkeitsprofil liefert. Die Abnahme der relativen Turbulenzintensität der x- und der z-Komponente und damit die Unterdrückung der Turbulenz ist jedoch eindeutig. UMEYAMA & GERRITSEN (1992) schlugen eine durch einen Faktor erweiterte Berechnung der Mischungsweglänge vor. Mit Hilfe des Faktors, der von der Korngröße und der Konzentration des suspendierten Sediments abhängt, soll eine über die Tiefe ungleichmäßige Schwebstoffkonzentration berücksichtigt werden. COLEMAN (1981, 1986) widersprach der Variabilität von κ und sah vielmehr den Wakeparameter II (siehe Kap. 3.2.5) als Funktion der Schwebstoffkonzentration an. Die Reanalyse der Daten durch WANG ET AL. (2001) zeigte jedoch eine bessere Beschreibung der Messungen durch angepasste κ -Werte. In neuesten Untersuchungen des Strömungsfeldes eines Naturkanals konnten NIKORA & GORING (2002), wie auch schon LYN (1992) im Labor, keine Beeinflussung turbulenter Größen durch den Schwebstoffgehalt feststellen, so dass eine Reduktion von κ wieder in Frage gestellt zu sein scheint. LYN (1992) führte die Versuche im Übergangsbereich von strömendem zu schießendem Abfluss durch. Da aber TOMINAGA & NEZU (1992) für zunehmende Froude-Zahlen und CELLINO & GRAF (1999) für steigende Schwebstoffkonzentrationen jeweils abnehmende relative Turbulenzintensitäten der x-Komponente beobachteten, wäre als Effekt einer Kombination eine verstärkte Reduzierung von σ_u/u_* zu erwarten. Die Versuche von NIKORA & GORING (2002) wurden bei geringfügigem Geschiebetransport durchgeführt, der laut NIKORA & GORING (2000) die gleiche widerstandsreduzierende Wirkung wie Additive hat. Auch hier wäre also eine Verstärkung des Effekts zu erwarten gewesen. Gründe für die widersprüchlichen Ergebnisse sind bisher nicht feststellbar.

GUST & SOUTHARD (1983), WANG & LARSEN (1994), WIJETUNGE & SLEATH (1998) und NIKORA & GORING (1999, 2000) berichten von abnehmenden κ -Werten aufgrund von Geschiebe-

transport. NIKORA & GORING führten die Reduktion des Fließwiderstandes auf eine abnehmende Häufigkeit von Burstereignissen zurück.

Neben dem Einfluss von Sedimenttransport, in Schwebelagern oder als Geschiebe, wurden auch über fixierten Sohlen Änderungen der Mischungsweglänge, also von κ , beobachtet. GUPTA & PAUDYAL (1985) berechneten κ aus Geschwindigkeitsprofilen, die über einem durchlässigen, vollkommen rauhen Sohlenkörper gemessen wurden, zu 0,28. Für eine undurchlässige Sohle bei gleicher Rauheit und relativer Überdeckung betrug $\kappa = 0,38$. Über einer hydraulisch glatten, durchlässigen Sohle wurde κ von GUST & SOUTHARD (1983) zu 0,38 - 0,43 bestimmt.

O'LOUGHLIN & MACDONALD (1964) haben in Untersuchungen zur Rauheitsdichte für relative Überdeckungen $z_{\max}/k < 10$ höhere Fließgeschwindigkeiten gemessen als nach Gl. (3.15) zu erwarten gewesen wären. Lediglich für eine sehr geringe Rauheitsdichte (Sand, $k = 2,9$ mm, $c_k = 0,0077$) sowie eine sehr hohe Dichte der Rauheitselemente (Würfel, $k = 12,7$ mm, $c_k = 0,7$), d.h. also für relativ glatte Sohlen, bestimmten sie κ zu ca. 0,4. Alle anderen untersuchten Rauheitsdichten lieferten $\kappa \approx 0,33$. Der Einfluss der Rauheitsdichte auf die Turbulenz der Strömung wurde von NOWELL & CHURCH (1979) bei konstanter relativer Überdeckung $z_{\max}/k = 8$ untersucht. Die Ergebnisse führten zu der Schlussfolgerung, dass in Strömungen über rauhen Sohlen mit begrenzter Wassertiefe keine einfache, allgemeingültige turbulente Längeneinheit existiert, wie z.B. eine Mischungsweglänge.

ASHIDA & BAYAZIT (1973) und BAYAZIT (1976, 1982) stellten in Versuchen zum Einfluss der relativen Überdeckung über Kiessohlen respektive Halbkugeln und Dreiecken ebenfalls eine systematische Abweichung der gemessenen von den berechneten Geschwindigkeiten fest. Allerdings ermittelten sie aus den Messdaten kleinere Geschwindigkeiten als nach dem logarithmischen Gesetz zu erwarten wären. Demnach müsste κ mit abnehmender relativer Überdeckung größer werden. BAYAZIT (1976) ermittelte für eine von 1,07 bis 4,6 zunehmende relative Überdeckung eine Reduzierung der Konstanten κ von 1,38 auf 0,42. Im Widerspruch dazu steht der von BAYAZIT (1982) empfohlene Wert $\kappa = 0,25$ für $h/k < 3$. Die Inkonsistenz in den Ergebnissen wurde von BAYAZIT nicht diskutiert und kann aufgrund fehlender Angaben in den Veröffentlichungen leider nicht reanalysiert werden.

DITTRICH & KOLL (1997) erzielten unter der Annahme eines von der Strömung unabhängigen Versatzes d sowie einer vorgegebenen äquivalenten Sandrauheit k_S mit $\kappa = 0,18$ gute Übereinstimmungen von gemessenen und berechneten Geschwindigkeitsprofilen über einer dichtest gelagerten Kiessohle ($k = 28$ mm) bei geringen relativen Überdeckungen zwischen 3,4 und 11,9 (Abb. 3.19). Weiterhin zeigten sie unter Verwendung der Daten von WANG ET AL. (1993), dass die relative Turbulenzintensität mit abnehmender relativer Überdeckung geringer wird, obwohl mit zunehmender Rauheit vermehrt mittlere Energie des Strömungsfeldes in turbulente kinetische Energie überführt wird. Dargestellt ist dies durch den Maximalwert von σ_u/u_* als Funktion von z_{\max}/k in Abb. 3.20. Die abnehmende relative Turbulenzintensität kann damit begründet werden, dass die hochenergetischen makroturbulenten Strukturen durch geringer werdende Wassertiefen in ihrer Ausbildung behindert, die kleinskaligen Turbulenzen jedoch nicht vom Verhältnis Wassertiefe zu Rauheitshöhe beeinflusst werden (KIRKBRIDE, 1993; NEZU & NAKAGAWA, 1993a). Eine Behinderung der Ausbildung kohärenter Strukturen bedeutet wiederum einen verringerten Fließwiderstand, was sich in der Steigung

des Geschwindigkeitsprofils und folglich in der von Kármán Konstante niederschlägt. Ebenfalls für einen mit abnehmendem Verhältnis z_{\max}/k verringerten Widerstand spricht die Abnahme der maximalen Reynoldsspannung, wie dies z.B. von CHEN & ROBERSON (1974) in Rohrströmungen und NIKORA & GORING (2000) in Naturversuchen beobachtet wurde.

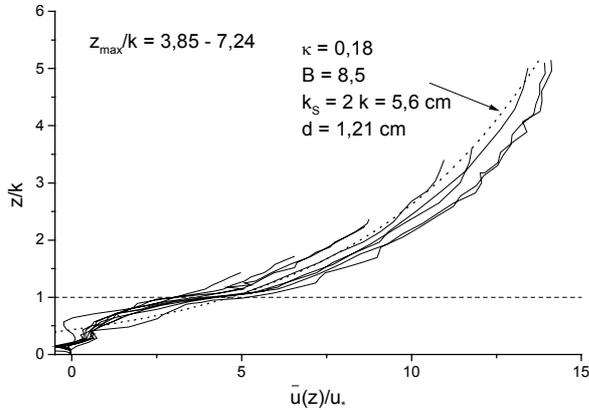


Abb. 3.19 Geschwindigkeitsprofile bei geringen relativen Überdeckungen (nach DITTRICH & KOLL, 1997; modifiziert)

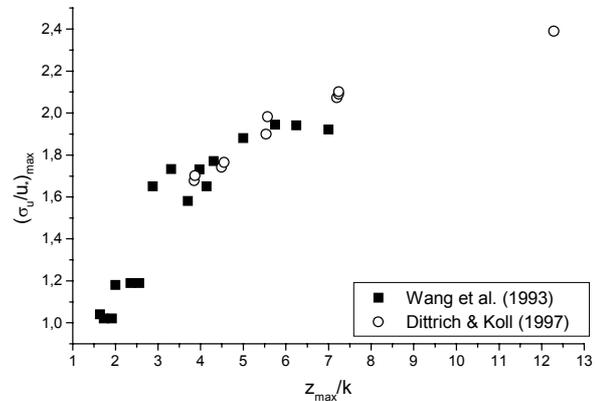


Abb. 3.20 Maximalwert der relativen Turbulenzintensität $(\sigma_u/u)_{\max}$ als Funktion der relativen Überdeckung

Die Bedeutung der verschiedenen Wirbelgrößen für den Fließwiderstand verdeutlicht die Methode der Generierung von Zufallsverteilungen (phase randomization) ausgewählter Wellenzahlenbereiche (HANDLER ET AL., 1993; GORING & NIKORA, 1999). Auf Ergebnissen aus direkter numerischer Simulation basierend, zeigten HANDLER ET AL. (1993), dass eine Störung höherer Wellenzahlen, d.h. der mittel- und kleinskaligen Wirbel, zu einer nur geringfügigen Änderung des Fließwiderstandes führt. Die Störung der großskaligen Wirbel führt jedoch zu Veränderungen charakteristischer Turbulenzgrößen, die derjenigen von Additiven ähnlich ist, obwohl die widerstandsreduzierenden Mechanismen unterschiedlich sind. Anstatt den Burstprozess zu unterdrücken bewirkt phase randomization ebenso wie Unregelmäßigkeiten in der Sohlenoberfläche (KIRKBRIDE, 1993) eine Minderung der Kohärenz turbulenzproduzierender Strukturen, wie z.B. der sohlennahen Wirbelstreifen (Abb. 3.18). Die Unterdrückung bzw. Zerstörung der Wirbelstreifen erreichten SIROVICH & KARLSSON (1997) in Laborexperimenten durch unregelmäßig angeordnete Rauheitselemente. Eine regelmäßige Rauheitsanordnung erhöht hingegen aufgrund der stabilisierten kohärenten Strukturen den Fließwiderstand. Mit Hilfe dieser Ergebnisse lassen sich die Messungen von PITLICK (1992) erklären, wonach die Steigung der Geschwindigkeitsprofile über bewegten ebenen Sohlen größer ist, d.h. die κ -Werte bzw. Fließwiderstände sind geringer, als über Sohlen mit Transportkörpern.

Die über rauen Sohlen bei relativ geringen Wassertiefen von $\kappa \approx 0,4$ abweichenden Ergebnisse aus Versuchen mit Klarwasserabfluss wurden auf das Problem des Bezugsniveaus zurückgeführt und durch die Einführung des vertikalen Versatzes d scheinbar gelöst. Die damit verbundenen Probleme sind in den vorangehenden Abschnitten erläutert. Die Ausführungen zeigen, dass kohärente Strukturen über rauen Sohlen zwar existieren, ihre Ausbildung, Beständigkeit und ihr Aufbrechen jedoch von Fluideigenschaften, der Sohlenbeschaffenheit und der relativen Überdeckung abhängen. Damit besteht kein Grund, die Mischungsweglänge bzw. die von Kármán Konstante als universell zu betrachten.

3.2.4.4 Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit u_*

Eine wesentliche Größe zur Berechnung des vertikalen Geschwindigkeitsprofils ist die Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit, da sie die der Strömung entgegenwirkende Schubspannung in den Dimensionen einer Geschwindigkeit charakterisiert (Gl. 3.5). Zur Berechnung von u_* stehen verschiedene Methoden zur Verfügung, die im folgenden kurz zusammengestellt sind (siehe auch NEZU & NAKAGAWA, 1993a).

Über glatten Sohlen ist die viskose Grenzschicht meistens ausreichend hoch, um das Geschwindigkeitsprofil in dieser Schicht messen zu können. u_* wird dann nach dem universellen Wandgesetz Gl. (3.9) berechnet:

$$u_* = \sqrt{\nu \cdot \frac{\bar{u}(z)}{z}}$$

Über rauen Sohlen kann u_* unter Voraussetzung der Gültigkeit des logarithmischen Wandgesetzes nach NIKURADSE (Gl. 3.15) berechnet werden. Abb. 3.21 verdeutlicht die von CLAUSER (1956) vorgeschlagene Methode. Ist die Einführung des vertikalen Versatzes d erforderlich, um $\kappa = 0,4$ setzen zu können, versagt diese Methode, da dann sowohl u_* als auch d unbekannt sind.

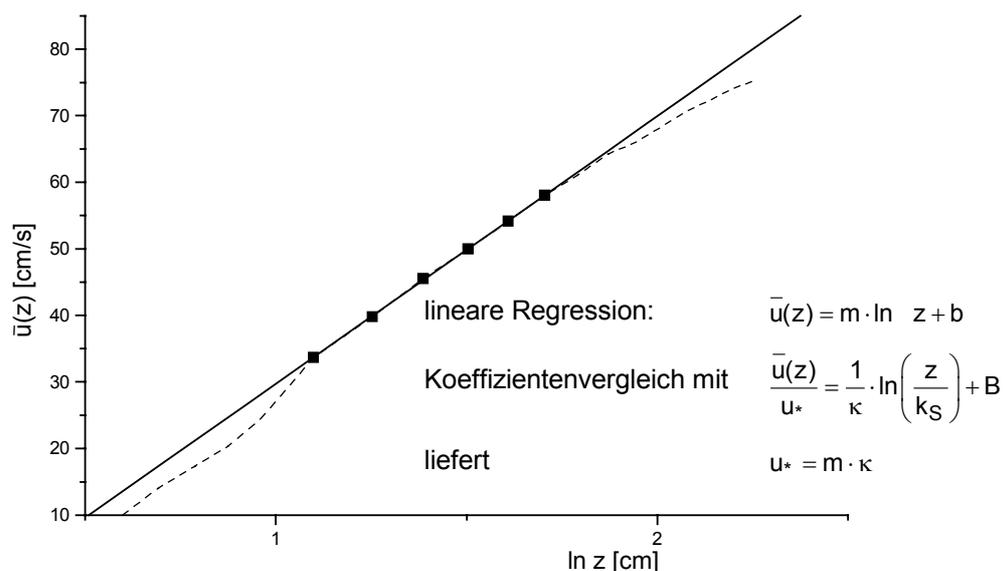


Abb. 3.21 Berechnung von u_* mit Hilfe des logarithmischen Geschwindigkeitsgesetzes nach Gl. (3.15) (Daten aus DITTRICH & KOLL, 1997)

Neben der Verwendung parameterbehafteter Formeln kann u_* aus den in x - und z -Richtung gemessenen Geschwindigkeitsschwankungen bestimmt werden. Aus den turbulenten Schwankungen werden die Reynoldsspannungen $-\overline{u'w'}$ berechnet und über die mit der Wassertiefe normierte z -Koordinate aufgetragen (Abb. 3.22). Die Verlängerung der linearen Regressionsgeraden bis $z/h = 0$ ergibt u_* . Der Einfluss der kinematischen Zähigkeit und über rauen Sohlen der rauheitsinduzierten Wirbelviskosität, die den Rückgang der Reynoldsspannungen im sohlennahen Bereich bewirken, werden hierbei vernachlässigt. Der Wert von u_* ist damit direkt von der Wahl des Ursprungs der vertikalen Koordinate z abhängig.

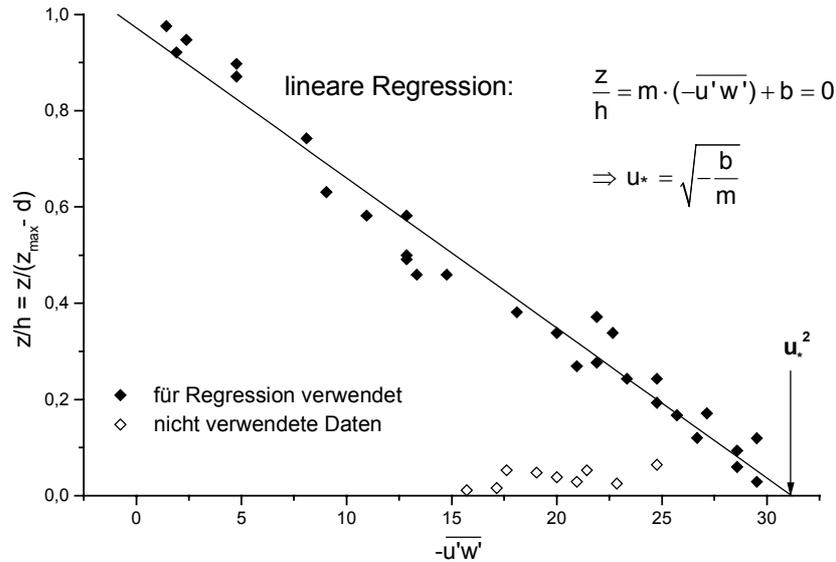


Abb. 3.22 Berechnung von u_* aus der Verteilung der Reynoldsspannungen (Daten aus NIKORA & GORING, 2000)

Weiterhin kann die Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit integral aus der Definition (Gl. 3.5) nach

$$u_* = \sqrt{g \cdot h \cdot I_S}$$

bzw. mit dem hydraulischen Radius anstelle der Wassertiefe bei geringen Breiten-/Tiefenverhältnissen berechnet werden. Bei leicht ungleichmäßigem Abfluss wird die Sohlenneigung I_S durch das Energieliniengefälle I_E ersetzt. Auch hier ist die Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit direkt vom vertikalen Koordinatenursprung abhängig, was die Berechnung des Geschwindigkeitsprofils wiederum auf das Problem der Festlegung des Bezugsniveaus zurückführt.

3.2.5 Außenschicht

Das logarithmische Wandgesetz ist, wie erwähnt, aufgrund der Annahme einer konstanten Schubspannung auf den Bereich bis etwa 20 % der Wassertiefe beschränkt. Zur Beschreibung des Geschwindigkeitsprofils in der Außenschicht entwickelte COLES (1956) das *Wake-Gesetz* (im englischen *velocity defect law*). Neben der linearen Verteilung der Schubspannung wird der Einfluss des freien Wasserspiegels durch Addition der Wake-Funktion berücksichtigt:

$$\frac{\bar{u}(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln \left(\frac{z \cdot u_*}{\nu} \right) + \text{const.} + \underbrace{\frac{2 \cdot \Pi}{\kappa} \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{z}{h_{\max}} \right)}_{\text{Wake-Funktion nach Coles (1956)}} .$$

Die Integrationskonstante wird aus der Bedingung bestimmt, dass in der Tiefe $z = h_{\max}$ die Geschwindigkeit $u = u_{\max}$ vorliegt. Das „Wake-Gesetz“ lautet dann:

$$\frac{u_{\max} - \bar{u}(z)}{u_*} = -\frac{1}{\kappa} \cdot \ln \left(\frac{z}{h_{\max}} \right) + \frac{2 \cdot \Pi}{\kappa} \cdot \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{z}{h_{\max}} \right). \quad (3.17)$$

Basierend auf Messungen in glatten Röhren gab COLES (1956) den Wert des Parameters Π mit 0,55 an. In offenen Gerinneströmungen wurden jedoch im allgemeinen deutlich geringere Werte zwischen 0,08 und 0,2 ermittelt (DITTRICH, 1998). COLEMAN (1981, 1986) stellte in Versuchen mit kohäsionslosem Schwebstoff eine Abhängigkeit des Wake-Parameters von der Richardson-Zahl fest. Seinen Untersuchungen zufolge nimmt Π von 0,19 bei Klarwasserabfluss bis ca. 0,9 bei erreichter Transportkapazität zu. Die obigen Werte wurden jeweils unter der Voraussetzung bestimmt, dass $\kappa \approx 0,4$ ist. WANG ET AL. (2001) konnten bei einer Reanalyse der Daten von COLEMAN und anderen keine Funktionalität des Wake-Parameters von der Richardson-Zahl feststellen, da sie die von Kármán Konstante als variabel betrachteten.

Wie schon für den logarithmischen Bereich wurden auch für die Außenschicht, der Hypothese der Wandgleichheit (wall similarity hypothesis) von PERRY & ABELL (1977) folgend, Ergebnisse aus Untersuchungen über glatten Sohlen auf das Strömungsfeld über rauen Sohlen übertragen. Demnach ist das Strömungsfeld außerhalb der Rauheitsschicht bei ausreichend hohen Reynolds-Zahlen unabhängig von der Sohlenbeschaffenheit. Basierend auf dem Vergleich von Versuchen im Windkanal über glatten und rauen Sohlen des k-Typs (siehe Kap. 3.2.3.1) stellten KROGSTAD ET AL. (1992) diese Hypothese in Frage, da sowohl das mittlere Geschwindigkeitsfeld als auch die turbulenten Bewegungen bis weit in die Außenströmung hinein von der Rauheit beeinflusst werden. Sie fassten ihre Ergebnisse in der Aussage zusammen, dass das Konzept einer universellen Bewegung aufgrund der Verfügbarkeit neuer Turbulenzdaten aus Messungen über verschiedenen Arten von rauen Sohlen neu überdacht werden sollte.

3.3 Neue Methode zur Bestimmung der Parameter des wandnahen Geschwindigkeitsfeldes

Die Diskussion der zur Beschreibung des vertikalen Geschwindigkeitsprofils erforderlichen Parameter verdeutlicht, dass die für glatte Sohlen und große relative Überdeckungen gültigen Ansätze und Werte nicht direkt auf raue Sohlen und geringe relative Überdeckungen übertragbar sind. Die Problematik lässt sich dabei auf die Bestimmung des Bezugsniveaus des logarithmischen Geschwindigkeitsprofils zurückführen, d.h. auf die Definition des vertikalen Versatzes d (Kap. 3.2.4.2). Im folgenden wird deshalb eine neue Definition des Parameters d vorgestellt, auf der die Bestimmung von u_* und κ beruht. Damit ist weiterhin eine neue Bestimmung der Integrationskonstanten B sowie der äquivalenten Sandrauheit k_s (Kap. 3.2.4.1) verbunden.

Die in Abb. 3.23 nochmals zusammengestellten Gleichungen zur Beschreibung der Geschwindigkeitsverteilung des wandnahen Strömungsfeldes über rauen Sohlen erfolgte anhand der zeitlich gemittelten Geschwindigkeiten \bar{u} . Diese können, wie in Kap. 3.1.4 gezeigt wurde, direkt durch die doppelt gemittelten Geschwindigkeiten $\langle \bar{u} \rangle$ ersetzt werden, d.h. die räumliche Mittelung bewirkt generell keine Verfälschung der Geschwindigkeitsprofile.

Die zu bestimmenden Parameter der einzelnen Bereiche der Wandregion sind (Abb. 3.23):

- die oberen Grenzen der Schichten z_{R2} , z_R und z_L
- die Geschwindigkeiten u_{R2} und u_R in Höhe der oberen Grenzen der forminduzierten Unterschichten
- die Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit u_*
- die Mischungsweglängen in den forminduzierten Unterschichten l_{R2} und l_R
- der vertikale Versatz d
- die von Kármán Konstante κ .

$z_L = 0,2 (z_{max} - z_R) + z_R$			
logarithmische Schicht			
Option 1: $\frac{\langle \bar{u} \rangle(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln \left(\frac{z-d}{z_R-d} \right) + \frac{u_R}{u_*}, z_R \neq d$	Gl. (3.16a)		
Option 2: $\frac{\langle \bar{u} \rangle(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln \left(\frac{l_R + \kappa \cdot (z-d)}{l_R + \kappa \cdot (z_R-d)} \right) + \frac{u_R}{u_*}$	Gl. (3.16b)		
$z_R \geq k$			
erste forminduzierte Unterschicht			
$\frac{\langle \bar{u} \rangle(z)}{u_*} = \frac{z - z_R}{l_R} + \frac{u_R}{u_*}$	Gl. (3.12)	Rauheitschicht	innere Schicht = Wandregion
z_{R2}			
zweite forminduzierte Unterschicht			
$\frac{\langle \bar{u} \rangle(z)}{u_*} = \frac{z - z_{R2}}{l_{R2}} + \frac{u_{R2}}{u_*}$	Gl. (3.11)		
δ_v			
Grenzunterschicht			
$\frac{\langle \bar{u} \rangle(z)}{u_*} = \frac{u_* \cdot z}{v}$	Gl. (3.9)		

Abb. 3.23 Zusammenstellung der Berechnungsansätze des vertikalen Geschwindigkeitsprofils in der Wandregion

Die viskose Grenzschicht wurde hier der Vollständigkeit halber dargestellt, obwohl sie über vollkommen rauhen Sohlen vermutlich nicht mehr vorhanden oder zumindest vernachlässigbar klein ist.

Die Grenzen der verschiedenen Schichten der Wandregion können durch Optimierung der Regressionskoeffizienten von linearen Trends in den beiden forminduzierten Unterschichten und einem logarithmischen Trend in der logarithmischen Schicht bestimmt werden, wobei die doppelt gemittelte Geschwindigkeit als Funktion der z-Koordinate aufgetragen wird. Damit sind auch die Geschwindigkeiten für $z = z_{R2}$ und $z = z_R$ bestimmt. Die obere Grenze der logarithmischen Schicht wird unter der Voraussetzung, dass die Sohlenschubspannung bis 20 % der freien Strömung als konstant angenommen werden kann, wie folgt berechnet:

$$z_L = 0,2 \cdot (z_{\max} - z_R) + z_R,$$

wobei z_{\max} die Wassertiefe zwischen Rauheitsunterkante und Wasserspiegel ist (vgl. Abb. 3.2).

Die Berechnung der Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit erfordert die Kenntnis des Bezugsniveaus und damit des vertikalen Versatzes d . Aufgrund der in Kap. 3.2.4 erarbeiteten Bedeutung, die der Bezugsebene des logarithmischen Geschwindigkeitsprofils zukommt, wird hier eine neue Definition des vertikalen Versatzes d eingeführt, der den Abstand zwischen dem zunächst willkürlich gewählten Ursprung der vertikalen Koordinate z und dem für das logarithmische Profil maßgeblichen Koordinatenursprung angibt.

Der neuen Definition zufolge kann das Bezugsniveau als diejenige Ebene interpretiert werden, die von den großen Wirbeln der freien Strömung oberhalb der Rauheitselemente als Bezugsebene „gefühl“ wird. Zur Verdeutlichung dieser Interpretation kann das Beispiel von glatten Autoreifen (Slicks) auf einer nassen Strasse herangezogen werden (NIKORA ET AL., 2002b). Die Reifen verlieren bei entsprechend hoher Geschwindigkeit und ausreichend Wasser auf der Straße den direkten Kontakt zur Straßenoberfläche, die ebenfalls als glatt angenommen wird. Dieser Effekt ist als Aquaplaning bekannt und steht als Vergleich für die viskose Unterschicht über einer glatten Sohle. Fährt das Auto über eine mit Schotter bedeckte Strasse, dann berühren die Reifen wiederum nicht die Straßenoberfläche, sondern befinden sich teilweise zwischen den Rauheitselementen. Die tatsächliche Fahrebene liegt zwischen der Rauheitsober- und -unterkante. Mit dem Ursprung der vertikalen Koordinate auf der glatten Straßenoberfläche ist der Abstand zwischen der Straßenoberfläche und der Fahrebene gleich dem Versatz d . Übertragen auf das turbulente Geschwindigkeitsfeld bedeutet dies, dass der vertikale Versatz d gerade der Höhe z entspricht, in der die Mischungsweglänge des logarithmischen Bereichs Null ist:

$$d = z \quad (l_L = 0).$$

Mit dieser Definition kann die Abhängigkeit des Bezugsniveaus sowohl von der Rauheit als auch von der Strömung berücksichtigt werden. Der wesentliche Vorteil gegenüber der herkömmlichen Definition liegt darin, dass weder zuvor festgelegte Konstanten, die möglicherweise nicht gültig sind, noch die Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit benötigt werden.

Mit der Definition der Mischungsweglänge nach PRANDTL (1933) gilt:

$$l_L(z) \cdot u_* \cdot \frac{d \langle \bar{u} \rangle}{dz} = \kappa \cdot (z - d) \cdot u_* \cdot \frac{d \langle \bar{u} \rangle}{dz} = u_*^2.$$

Die Mischungsweglänge l_L ist proportional zu z , so dass die Auftragung von $\frac{l_L(z)}{u_*} = \frac{1}{d \langle \bar{u} \rangle / dz}$ über z (Abb. 3.24) eine Gerade mit der Gleichung

$$\frac{l_L(z)}{u_*} = m_L \cdot z + b_L$$

liefert. Mit obiger Definition des vertikalen Versatzes folgt dann:

$$d = -\frac{b_L}{m_L}.$$

Damit kann die Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit entweder aus den Reynoldsspannungen in der Tiefe $z = d$ berechnet werden oder integral nach:

$$u_* = \sqrt{g \cdot (z_{\max} - d) \cdot I_S},$$

wobei wiederum der Koordinatenursprung von z bei der Rauheitsunterkante liegt (siehe Abb. 3.2).

Mittels Koeffizientenvergleich mit Gl. (3.13b)

$$l_L(z) = \kappa \cdot z - \kappa \cdot d$$

wird κ berechnet:

$$\kappa = m_L \cdot u_*.$$

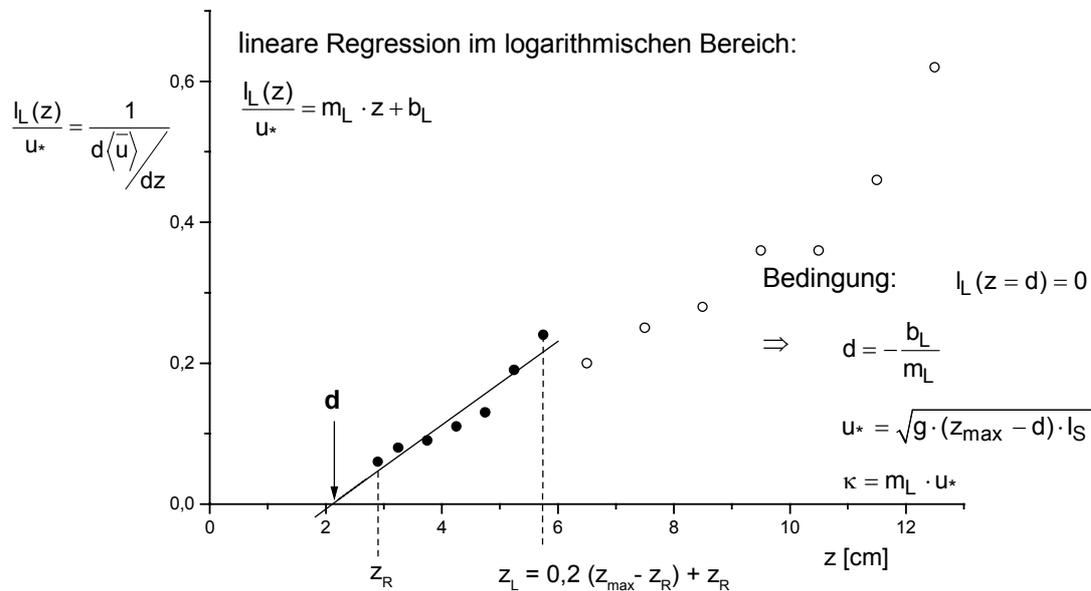


Abb. 3.24 Berechnung des vertikalen Versatzes d und der von Kármán Konstante κ (Daten aus DITTRICH & KOLL, 1997)

Für diese Erläuterung wurde der Ursprung der vertikalen Koordinate auf die Höhe der Unterkante der Rauheitselemente gelegt, da die Rinnensohle der weiter unten beschriebenen Versuche als einheitliches Bezugsniveau gewählt werden konnte. Wird die Rauheitsoberkan-

te als anfängliches Bezugsniveau gewählt, dann ist der vertikale Versatz zu addieren, d.h. $l_L(z) = \kappa \cdot (z + d)$.

An die Stelle der äquivalenten Sandrauheit k_S tritt die Größe $(z_R - d)$. Somit ist der als hydraulische Wirkung der Sohlenrauheit interpretierbare Parameter tatsächlich nicht nur eine Funktion des logarithmischen Bereichs, sondern auch der Rauheitsschicht.

Das Verfahren zur Berechnung der Mischungsweglängen l_R und l_{R2} ist in beiden Unterschichten gleich und wird am Beispiel der ersten Unterschicht erläutert. Die Auftragung der doppelt gemittelten Geschwindigkeit über die Tiefe z liefert eine Gerade mit der Steigung

$$m_R = \frac{d \langle \bar{u} \rangle}{dz} \quad (\text{Abb. 3.25}). \text{ Durch Umstellen der Gleichung (vgl. Kap. 3.2.3)}$$

$$l_R \cdot u_* \cdot \frac{d \langle \bar{u} \rangle}{dz} = u_*^2$$

und Einsetzen von m_R wird die Mischungsweglänge l_R berechnet:

$$l_R = \frac{u_*}{d \langle \bar{u} \rangle / dz} = \frac{u_*}{m_R}.$$

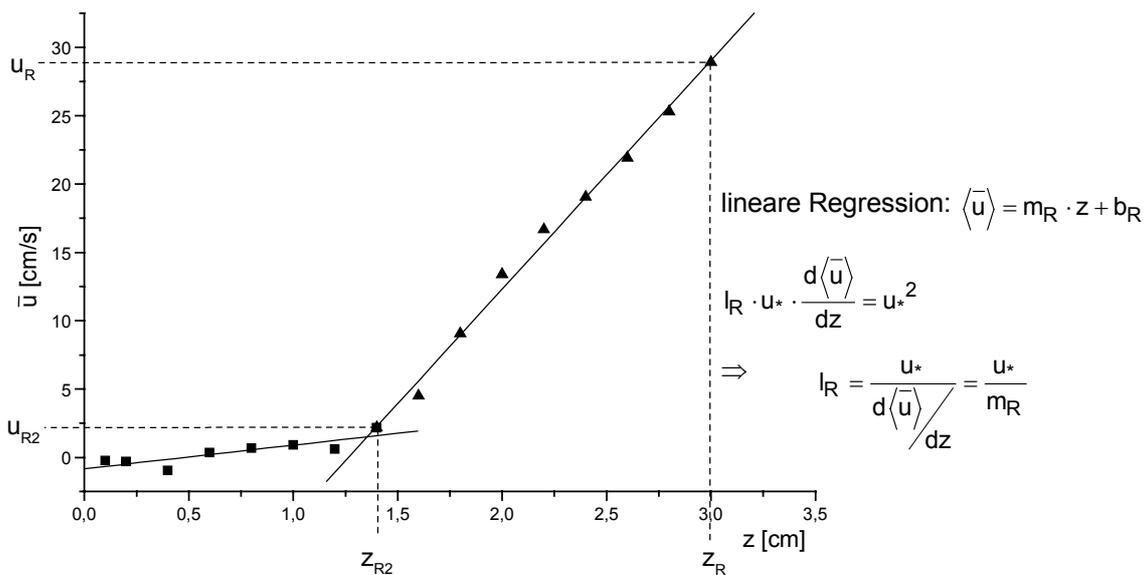


Abb. 3.25 Berechnung der Mischungsweglänge l_R der ersten forminduzierten Unterschicht (Daten aus DITTRICH & KOLL, 1997)

Für die Bestimmung der Integrationskonstanten der ersten forminduzierten Unterschicht und der logarithmischen Schicht wurde als Randbedingung jeweils die Grenze zwischen Rauheitsschicht und logarithmischem Bereich gewählt. Dadurch erscheint in den Gln. (3.12) und (3.16) das Verhältnis u_R/u_* , das als Integrationskonstante

$$C = \frac{u_R}{u_*} \quad (3.18)$$

definiert wird. Ob C der bisherigen Konstanten $B = 8,5$ gleich gesetzt werden kann, wird in der Datenanalyse (Kap. 3.5) überprüft.

3.4 Datengrundlage

Zur Überprüfung der in Abb. 3.23 zusammengestellten Gleichungen zur Beschreibung des sohlennahen Geschwindigkeitsfeldes wurden am Theodor-Rehbock-Laboratorium Versuche mit unterschiedlichen Sohlenrauheiten durchgeführt. Die Versuchsreihen werden im folgenden vorgestellt und die Berechnung der charakteristischen Parameter der einzelnen Versuche erläutert.

Die Versuche wurden in zwei verschiedenen Kipprinnen des Theodor-Rehbock-Laboratoriums durchgeführt, die in Abb. 3.26 und Abb. 3.27 skizziert sind. Die als „kleine Kipprinne“ bezeichnete Rinne ist 0,3 m breit, 0,4 m tief und 10 m lang. An der Einlaufseite ist sie drehbar gelagert und kann an der Auslaufseite in der Höhe verstellt werden, so dass sie stufenlos zwischen 0 und 5 % neigbar ist. Mit Ausnahme des Messbereichs bestehen die Wände sowie die Sohle der starren Stahlkonstruktion aus lackiertem Stahlblech. Die Seitenwände des 2 m langen Messbereichs sind aus Glas. Die „große Kipprinne“ hat eine Breite von 0,6 m, ist 0,7 m tief und 23,6 m lang. Wie die kleine Kipprinne ist die aus einem starren Stahlrahmen konstruierte Rinne im Einlaufbereich gelenkig gelagert und im Auslaufbereich höhenverstellbar, wodurch Neigungen zwischen 0 und 4 % einstellbar sind. Der Rinnenboden besteht aus lackiertem Stahlblech. Die Seitenwände bestehen durchgehend aus Glas.

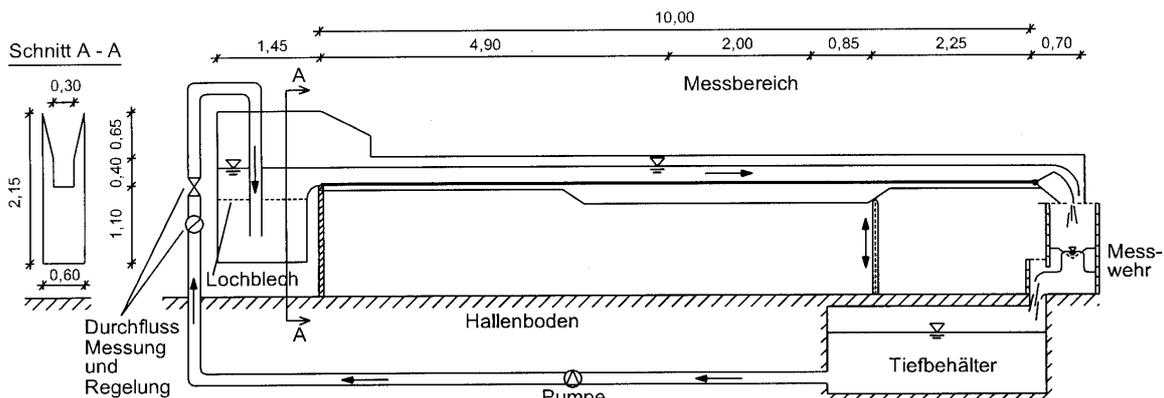


Abb. 3.26 Kleine Kipprinne des Theodor-Rehbock-Laboratoriums

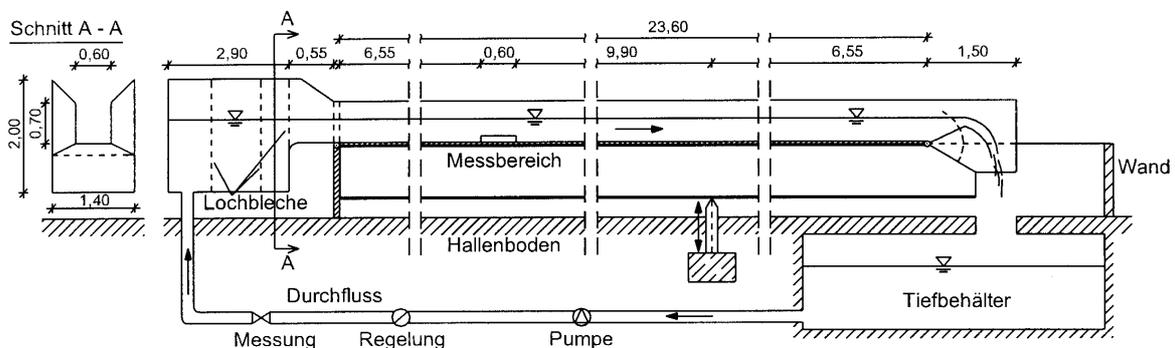


Abb. 3.27 Große Kipprinne des Theodor-Rehbock-Laboratoriums

Als Rauheitselemente wurden zum einen künstliche Elemente (Glaskugeln und PVC-Würfel) verwendet, die sich durch eine sehr regelmäßige Oberfläche und eindeutig bestimmbare

Rauheitshöhe und -dichte auszeichnen. Zum anderen wurde natürlicher Flusskies untersucht. Die Kornhöhe variierte nur geringfügig, die Form der einzelnen Elemente war jedoch sehr unterschiedlich (von nahezu rund bis ellipsoid), so dass die Oberfläche der Sohlenrauheit wesentlich unregelmäßiger war als bei den künstlichen Elementen. Die Anordnung und Dichte der Rauheitselemente variierte. Weiterhin wurde ein Bereich des Wienflusses, der mit Flussbausteinen ausgebaut ist, vermessen und im Labor nachgebildet. Die untersuchten Rauheiten sowie die Messpositionen sind in Abb. 3.28 dargestellt. An unterschiedlichen Positionen wurden die vertikalen Geschwindigkeitsprofile mit verschiedenen Laser-Doppler-Anemometern, die in Tab. 3.2 spezifiziert sind, bei verschiedenen relativen Überdeckung gemessen. In allen Versuchen wurden durch Regulierung mit am Ende der Rinnen befindlichen Schütze Normalabflussverhältnisse eingestellt. Die Versuchsparameter sind in Tab. 3.3 zusammengestellt. Die Versuche waren nicht speziell für die Anwendung der Methode der doppelten Mittelung durchgeführt worden, so dass teilweise nur sehr wenige Punkte zur räumlichen Mittelung zur Verfügung stehen.

Tab. 3.2 Spezifikation der verwendeten Laser

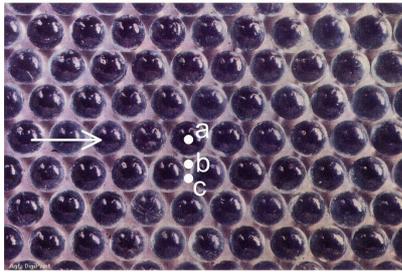
	L1	L2	L3	L4
Laser	Helium-Neon	Argon-Ion	Argon-Ion	Argon-Ion
Leistung	35 mW	5 ÷ 100 mW	0 ÷ 4000 mW	0 - 300 mW
Prozessor	IFA550	58N20FVA	IFA750	RSA-1000-L
Wellenlänge des Laserlichts	632,8 nm	514,5 nm	514,5 nm	514,5 nm
Abstand der Teilstrahlen an der Frontlinse	8 mm	8 mm	15 mm	9,47 mm
Brennweite der Linse in Wasser	80,57 mm	67,09 mm	147,57 mm	50,8 mm
Strahldurchmesser	0,30 mm	0,27 mm	0,53 mm	0,7 mm
Laserhalbwinkel	2,84 °	3,41 °	2,91 °	5,35 °
Messvolumen im Wasser:	4,37 mm	2,74 mm	3,59 mm	0,5 mm
Länge [mm], Breite [µm]	216,7 µm	163,1 µm	182,6 µm	47,54 µm
Abstand der Interferenzstreifen	5,39 µm	4,32 µm	3,78 µm	2,77 µm
Anzahl der Interferenzstreifen	40	50	48	17
maximale Bandbreite	1 kHz ÷ 15 MHz	-6 ÷ +30 MHz	300 Hz ÷ 90 MHz	-35 ÷ +80 MHz

Tab. 3.3 Versuchparameter zum Geschwindigkeitsfeld

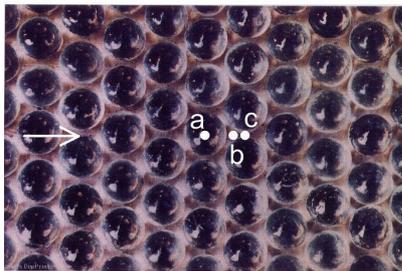
Rauheit	l_s ‰	Q l/s	k cm	z_{bm} cm	σ_k cm	c_k' -	z_{max} cm	h_m cm	h_m/k -	u_m cm/s	u_{+1} cm/s	Re -	Fr -	Re* -	B_R/h_m -
RK-bil (L1)	3	18,0	0,83	0,43	0,35	0,51	11,31	10,88	13,11	55,13	5,66	60000	0,53	470	2,8
RK-bs (L2)	3	18,3	0,83	0,45	0,34	0,54	11,38	10,93	13,17	55,80	5,67	61000	0,54	471	2,7
RK-cw (L2)	3	18,0	0,8	0,20	0,37	0,25	11,43	11,23	14,04	53,43	5,75	60000	0,51	460	2,7
RK-cw (L3)	2	26,5	0,8	0,20	0,37	0,25	16,47	16,27	20,34	54,29	5,65	88333	0,43	452	1,8
RK-cd (L3)	2	27,4	0,8	0,42	0,39	0,53	16,52	16,10	20,12	56,74	5,62	91333	0,45	450	1,9
R0-1	8,6	16,4	2,8	1,35	1,57	0,48	10,79	9,44	3,37	57,89	8,93	54667	0,60	2499	3,2
R0-2	5,5	18,9	2,8	1,35	1,57	0,48	12,56	11,21	4,00	56,19	7,78	63000	0,54	2178	2,7
R0-3	3	23,2	2,8	1,35	1,57	0,48	15,50	14,15	5,05	54,64	6,45	77333	0,46	1807	2,1
R0-4	1,61	30,2	2,8	1,35	1,57	0,48	20,27	18,92	6,76	53,20	5,47	100667	0,39	1531	1,6
RI-1	3	13,3	2,0	1,18		0,59	10,92	9,74	4,87	45,52	5,35	44333	0,47	1071	3,1
RI-2	3	18,5	2,0	1,18		0,59	13,04	11,86	5,93	51,98	5,91	61667	0,48	1182	2,5
RI-3	3	30,4	2,0	1,18		0,59	16,95	15,77	7,89	64,24	6,81	101333	0,52	1363	1,9
RI-4	3	43,8	2,0	1,18		0,59	20,85	19,67	9,83	74,23	7,61	146000	0,53	1522	1,5
RI-5	3	53,2	2,0	1,18		0,59	25,11	23,93	11,97	74,09	8,39	177333	0,48	1679	1,3
RII-1	3	12,6	2,5	0,77		0,31	11,05	10,28	4,11	40,87	5,50	42000	0,41	1650	2,9
RII-2	3	18,2	2,5	0,77		0,31	13,31	12,54	5,02	48,37	6,08	60667	0,44	1823	2,4
RII-3	3	30,5	2,5	0,77		0,31	17,42	16,65	6,66	61,05	7,00	101667	0,48	2100	1,8
RII-4	3	42,6	2,5	0,77		0,31	21,52	20,75	8,30	68,43	7,81	142000	0,48	2344	1,4
RII-5	3	53,3	2,5	0,77		0,31	25,32	24,55	9,82	72,36	8,50	177667	0,47	2550	1,2
RIII-1	3	12,4	3,5	0,89		0,25	11,04	10,15	2,90	40,71	5,47	41333	0,41	1913	3,0
RIII-2	3	17,0	3,5	0,89		0,25	13,45	12,56	3,59	45,12	6,08	56667	0,41	2128	2,4
RIII-3	3	29,6	3,5	0,89		0,25	17,46	16,57	4,73	59,55	6,98	98667	0,47	2444	1,8
RIII-4	3	41,0	3,5	0,89		0,25	21,46	20,57	5,88	66,43	7,78	136667	0,47	2723	1,5
RIII-5	3	52,2	3,5	0,89		0,25	25,18	24,29	6,94	71,64	8,45	174000	0,46	2959	1,2
RF-1	5	109,0	7,05	3,58	2,16	0,51	26,19	22,61	3,21	80,36	10,53	181667	0,54	7427	2,7
RF-2	5	145,2	7,05	3,58	2,16	0,51	35,19	31,61	4,48	76,57	12,45	242000	0,43	8782	1,9

3.4.1 Untersuchte Sohlenrauheiten

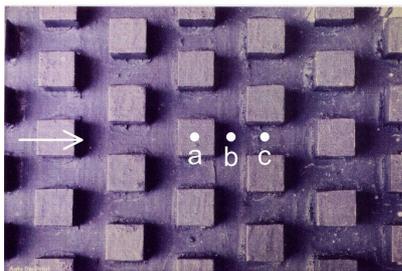
Versuchsreihe RK



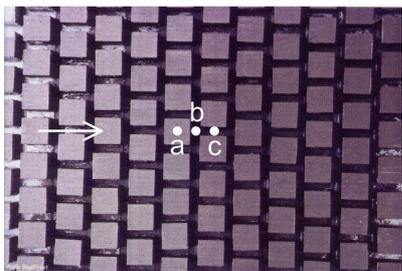
bil
(Kugeln in Reihe)
 $k = 0,83 \text{ cm}$
 $c_K' = 0,51$



bs
(Kugeln versetzt)
 $k = 0,83 \text{ cm}$
 $c_K' = 0,54$

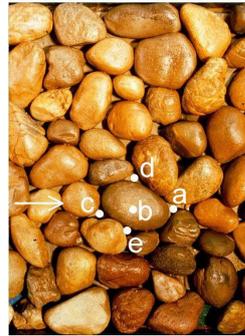


cw
(Wüfel weit)
 $k = 0,8 \text{ cm}$
 $c_K' = 0,25$

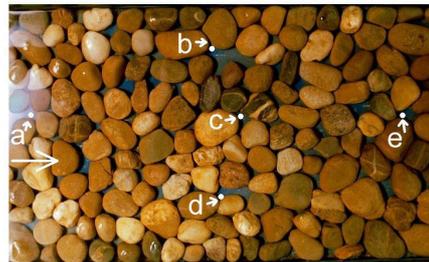


cd
(Wüfel dicht)
 $k = 0,8 \text{ cm}$
 $c_K' = 0,53$

Versuchsreihen R0, RI, RII und RIII



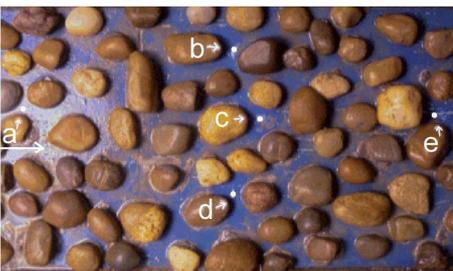
R0
 $k = 2,8 \text{ cm}$
 $c_K' = 0,48$



RI
 $k = 2,0 \text{ cm}$
 $c_K' = 0,59$

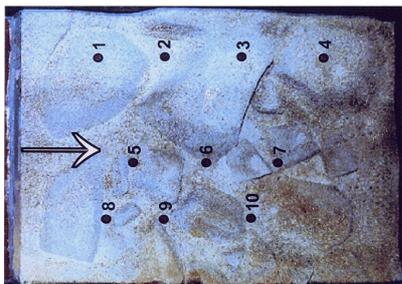


RII
 $k = 2,5 \text{ cm}$
 $c_K' = 0,31$



RIII
 $k = 3,5 \text{ cm}$
 $c_K' = 0,25$

Versuchsreihe RF



RF
(Wienfluss)
 $k = 7,05 \text{ cm}$
 $c_K' = 0,51$



Abb. 3.28 Darstellung der untersuchten Rauheiten

3.4.1.1 Künstliche Rauheiten

Die Versuche wurden in der kleinen Kiprinne durchgeführt. Die Rauheit der Sohle über die gesamte Rinnenlänge bestand zunächst aus in Reihe angeordneten Glaskugeln mit einem Durchmesser von 9 mm. Die Glaskugeln wurden auf Lochplatten geklebt, die auf den Rinnenboden gelegt wurden, wodurch die effektive Rauheitshöhe 8,3 mm betrug. 6 m unterstrom des Rinneneinlaufs befand sich der 2 m lange Messbereich, in dem die Platten zur Untersuchung verschiedener Rauheitsdichte, -anordnung und -art ausgetauscht wurden (siehe auch DITTRICH & HAMMANN DE SALAZAR, 1993). In der mit RK bezeichneten Versuchsreihe wurden neben den in Reihe angeordneten Glaskugeln (bil = beads in line) weiterhin versetzt angeordnete Glaskugeln (bs = beads staggered) mit der gleichen Rauheitsdichte sowie versetzt angeordnete PVC-Würfel (Rauheitshöhe $k = 8$ mm) bei zwei verschiedenen Rauheitsdichten (cw = cubes wide, cd = cubes dense) untersucht. Die Geschwindigkeiten wurden jeweils an drei Positionen gemessen (über, zwischen und hinter einem Element). Für die Versuche wurden drei verschiedene Laser verwendet (L1, L2, L3, Tab. 3.2). Das Strömungsfeld über den Rauheiten bil, bs und cd wurde für jeweils eine relative Überdeckung h/k untersucht. Die Verwendung des Lasers L3 benötigte eine größere Wassertiefe, weshalb für die Rauheitsanordnung cw zwei Verhältnisse h/k untersucht worden sind. Die mittlere Fließgeschwindigkeit u_m wurde jedoch konstant gehalten.

3.4.1.2 Natürliche Rauheiten

Kies R0

Der Boden der kleinen Kiprinne wurde gleichmäßig mit Kies in dichtester Lagerung bedeckt. Die mittlere Rauheitshöhe k betrug 28 mm. Für vier verschiedene relative Überdeckungen h/k , bei denen erneut die mittlere Fließgeschwindigkeit annähernd konstant gehalten worden ist, wurden mit dem Laser L4 (Tab. 3.2) an fünf Positionen um einen Stein in der Rinnenmitte herum die vertikalen Geschwindigkeitsprofile gemessen.

Kies RI -RIII

In den wiederum in der kleinen Kiprinne durchgeführten Versuchen ist der mittlere Korndurchmesser zunächst auf 20 mm verringert worden, um weitere relative Überdeckungen untersuchen zu können. Die Lagerung der Rauheitselemente der mit *RI* bezeichneten Sohlenrauheit war dichtest gepackt.

Für die zweite untersuchte Sohlenrauheit wurde etwa die Hälfte der Steine aus der Rinne genommen, so dass die Rauheitsdichte nur noch halb so groß war. Der Kies musste jetzt mit Zementschlemme an den Rinnenboden geklebt werden, da sich die Steine nicht mehr gegenseitig gegen den Strömungsangriff stützen konnten. Dadurch erhöhte sich die absolute Höhe der Rauheitselemente auf ca. 25 mm. Diese Sohlenrauheit wird mit *RII* bezeichnet.

In einer dritten Versuchsreihe *RIII* wurde ein Teil des Kieses durch Steine mit einem mittleren Korndurchmesser von 30 mm ersetzt. Die Lagerungsdichte war die gleiche wie in Versuchsreihe *RII* und die Rauheitshöhe betrug ca. 35 mm.

In allen drei Versuchsreihen wurden mit dem Laser L4 (Tab. 3.2) für jeweils fünf Wassertiefen die vertikalen Geschwindigkeitsprofile an fünf über den Messbereich verteilten Positionen

gemessen. Da diesmal die Neigung der Rinne konstant gehalten wurde, ergaben sich veränderliche mittlere Fließgeschwindigkeiten u_m .

RF

Die Versuche wurden in der großen Kippinne bei einer Neigung von 5 ‰ durchgeführt. Zur Bestimmung der Sohlenrauheit in der Natur wurde von der Boku Wien eine 2,5 x 2,5 m große Fläche des Wienflusses vermessen und im Theodor-Rehbock-Labor im Maßstab 1:4 aus Holz nachgebildet (SCHREIBER, 2000; RAUCH ET AL., 2001). Außerhalb des Messbereichs wurde eine ähnliche Sohlenrauheit durch Grobkies und Ziegelsteine simuliert. Für zwei Wassertiefen wurden an jeweils zehn Positionen die vertikalen Geschwindigkeitsprofile gemessen. Auch hier wurde der Laser L4 (Tab. 3.2) verwendet.

3.4.2 Versuchsparameter

Die Versuchsparameter, deren Berechnung resp. Bestimmung im folgenden beschrieben wird, sowie die Sohlenneigung I_s , der Durchfluss Q und die Rinnenbreite B_R sind in Tab. 3.3 zusammengestellt. Zur Definition der vertikalen Abmessungen siehe auch Abb. 3.2.

Der *Ursprung der vertikalen Koordinate z* wurde für die künstlichen Rauheiten RK auf die Oberkante der Platten gelegt, auf denen die Rauheitselemente befestigt worden waren, im Fall der Rauheit RF in den tiefsten Punkt und für die Rauheiten R0 bis RIII auf den Stahlböden der Rinne. Der Abstand zwischen $z = 0$ und dem Wasserspiegel wird mit z_{\max} bezeichnet.

Die *absolute Rauheitshöhe k* gibt die Höhe zwischen Rinnenboden (bzw. Platte) und mittlerer Oberkante der Rauheitselemente an. Sie wurde durch Ausmessen der Rauheitselemente mit Hilfe eines Spitzentasters im Messbereich bestimmt. Im Fall der Rauheit RF ist k der Abstand zwischen dem tiefsten und dem höchsten Punkt, da die Rauheit sehr unregelmäßig war und nicht aus einzelnen Elementen bestand.

Die Sohlen der Rauheiten R0 und RF wurden mit einem Laserabstandsmessgerät (OPTImess 100 HP der Firma TDP, mittlere Messgenauigkeit = 0,06 mm) aufgenommen, woraus die *Standardabweichung der Rauheitshöhe σ_k* bestimmt werden konnte. Der Abstand der Messpunkte betrug bei der Rauheit R0 sowohl in x- als auch in y-Richtung $\Delta x = \Delta y = 1$ mm und die Größe der vermessenen Fläche $B_A \times L_A = 155 \times 170$ mm. Im Fall RF wurde eine 390 x 640 mm große Fläche mit Abständen in x- und y-Richtung von $\Delta x = \Delta y = 2$ mm ausgemessen. Die Auflösung in vertikaler Richtung beträgt 1/100 mm. Die Rauheiten RI, RII und RIII waren nicht vermessen worden. Die in Tab. 3.3 aufgeführte Standardabweichung der Rauheitshöhe wurde für die künstlichen Rauheiten anhand der Fotos rekonstruiert.

Die *mittlere Rauheitshöhe z_{bm}* wird benötigt, um die abflusswirksame Wassertiefe definieren zu können. Bei sehr großer Rauheitsdichte (z.B. R0) trägt der Raum unterhalb der Rauheitsoberkante kaum zum Abflussgeschehen bei, während bei einer geringen Rauheitsdichte auch der Raum zwischen den Elementen zu berücksichtigen ist. Dem Verfahren von SCHLICHTING (1936) folgend wird die Höhe verwendet, die die eingeschmolzenen Rauheitselemente erreichen würden. Hierzu wurden anhand der in Abb. 3.28 dargestellten Fotos die Feststoffvolumina V_{Fest} über eine bestimmte Fläche ermittelt und durch diese Fläche geteilt:

$$z_{bm} = \frac{V_{Fest}}{B_A \cdot L_A}.$$

B_A und L_A sind die Breite und die Länge der betrachteten Fläche.

Die Rauheit RF bestand nicht aus einzelnen Elementen, weshalb in diesem Fall das Feststoffvolumen anhand der Laserabtastung wie folgt berechnet wurde:

$$V_{Fest} = \sum_{i=1}^n (z_i - z_{min}) \cdot \Delta x \cdot \Delta y.$$

Für ellipsoide oder runde Rauheitselemente ist die Berechnung des Feststoffvolumens anhand von Daten aus Sohlenabtastungen nicht empfehlenswert. Der Laserstrahl kann die Verjüngung des Elements unterhalb der Mitte nicht messen, weshalb V_{Fest} überschätzt und die mittlere Rauheitshöhe z_{bm} unterschätzt wird. Die Volumina der einzelnen Rauheitselemente berechnen sich deshalb zu:

Würfel: $V_W = k^3$

Glaskugel: $V_G = \frac{\pi \cdot d_K^3}{6} - \pi \cdot d_A^2 \cdot \left(\frac{d_K}{2} - \frac{d_A}{3} \right)$

Kies: $V_K = \frac{\pi \cdot d_K^3}{6}$

wobei für den Kies als Kugeldurchmesser d_K die b-Achse entsprechend Abb. 3.29 verwendet wurde. d_A bezeichnet die Höhe des Kugelabschnitts, der im Fall der Glaskugeln durch die Art der Befestigung nicht zur Rauheitshöhe k beiträgt (siehe Abb. 3.29). V_{Fest} berechnet sich dann aus dem Volumen des einzelnen Elements multipliziert mit der Anzahl n der Elemente pro Fläche $B_A \times L_A$:

$$V_{Fest} = n \cdot V_{Element}$$

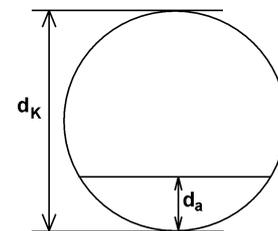
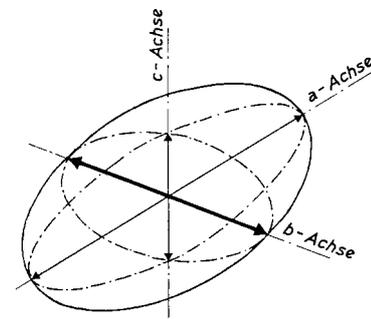


Abb. 3.29 Achsenbezeichnung bei Kies und den Glaskugeln

Die *abflusswirksame Wassertiefe* h_m berechnet sich zu

$$h_m = z_{max} - z_{bm},$$

womit nun die mittlere Fließgeschwindigkeit u_m , die Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit u_{*1} , die Korn-Reynolds-Zahl Re_* , die Reynolds-Zahl Re und die Froude-Zahl Fr berechnet werden können. Aufgrund der im Verhältnis zur Rauheit der jeweiligen Sohle sehr glatten Wände wird nicht der hydraulische Radius, sondern die Wassertiefe verwendet.

mittlere Fließgeschwindigkeit $u_m = \frac{Q}{B_R \cdot h_m}$

Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit $u_{*1} = \sqrt{g \cdot h_m \cdot I_S}$

Korn-Reynolds-Zahl $Re_* = \frac{u_* \cdot k}{\nu}$

Reynolds-Zahl $Re = \frac{u_m \cdot h_m}{\nu}$

Froude-Zahl $Fr = \frac{u_m}{\sqrt{g \cdot h_m}}$

wobei: Q [m^3/s] = Durchfluss, B_R [m] = Rinnenbreite, I_s [-] = Sohlenneigung, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ = Erdbeschleunigung, $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ = kinematische Viskosität.

Die Werte der einzelnen Parameter sind in Tab. 3.3 aufgeführt.

In der folgenden Auswertung der Versuche wird die Wassertiefe $h = z_{\max} - d$ zur Berechnung dieser Größen herangezogen (vgl. Abb. 3.2). Der Unterschied zwischen h und h_m ist so gering, dass die Verwendung von z_{bm} für eine erste Einordnung der Versuche gute Ergebnisse liefert (Abb. 3.30). Das bedeutet jedoch nicht, dass der vertikale Versatz d (siehe Kap. 3.2.4.2) mit z_{bm} gleichgesetzt werden kann, wie Abb. 3.31 im Vorgriff auf die Datenanalyse des folgenden Abschnitts zeigt.

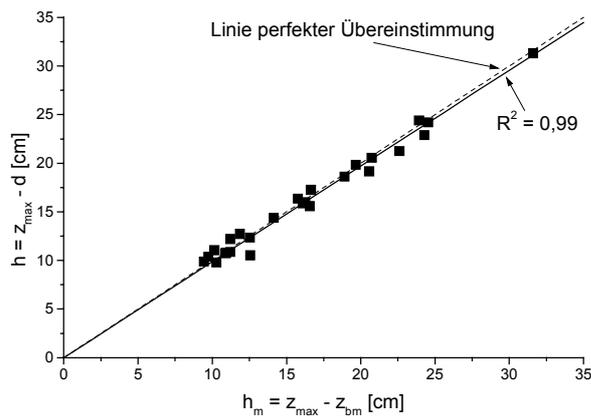


Abb. 3.30 Vergleich von h_m und h

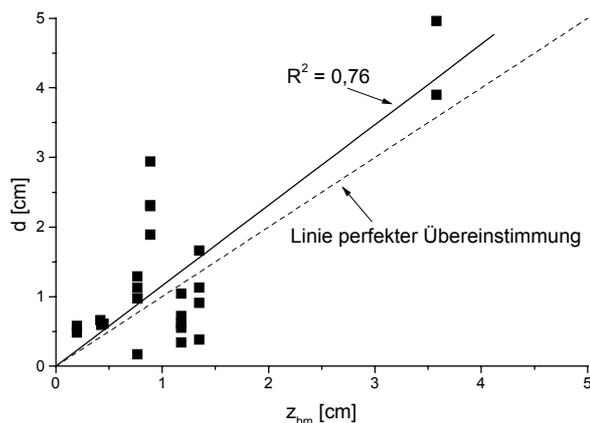


Abb. 3.31 Vergleich von d und z_{bm}

Die *Rauheitsdichte* c_K' wird wie in Kap. 3.2.3.1 beschrieben aus dem Verhältnis der mittleren Rauheitshöhe z_{bm} zur absoluten Rauheitshöhe k berechnet, da die Bestimmung der angeströmten Fläche A_{\perp} und der Grundfläche eines Rauheitselements A_G zur Berechnung von c_K für natürliche Rauheiten nur sehr ungenau und im Fall der Rauheit RF nicht möglich ist:

$$c_K' = \frac{z_{bm}}{k}$$

3.5 Datenanalyse

Die erforderlichen Parameter zur Anwendung der Gleichungen der Wandregion (Abb. 3.23) wurden nach der in Kap. 3.3 vorgestellten Methode bestimmt und sind in Tab. 3.4 zusammengestellt. Hierzu wurden die Geschwindigkeitsprofile jedes Versuchs zunächst zeitlich und anschließend räumlich gemittelt (siehe Anhang B2). Die Darstellung der normierten Standardabweichung der doppelt gemittelten Profile (Abb. 3.32 und Anhang B3) verdeutlicht, dass die Anzahl der Messvertikalen für eine statistisch sichere Auswertung der zweiten forminduzierten Unterschicht aufgrund der starken Schwankungen der Geschwindigkeiten zu gering ist. Die für diesen Bereich ermittelten Parameter z_{R2} , u_{R2} und l_{R2} können deshalb nur als Größenordnungen verstanden werden. Weiterhin zeigt sich der in Richtung des freien Wasserspiegels abnehmende Einfluss der Rauheit. Bei entsprechender Messdichte können die statistischen Momente (Standardabweichung, Schiefe und Kurtosis) zur Unterteilung des Geschwindigkeitsfeldes dienen und vermutlich auch zur Charakterisierung der Sohlenrauheit herangezogen werden. In der ersten forminduzierten Unterschicht sind die Geschwindigkeitsschwankungen bereits deutlich geringer, so dass trotz der geringen Anzahl der Messvertikalen die Bestimmung der Parameter z_R , u_R , l_R und C möglich ist. Für die logarithmische Schicht sind in Tab. 3.4 die Parameter z_L , κ und d angegeben. Die Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit u_* wird ebenfalls der logarithmischen Schicht zugeordnet, weil sie direkt von der Bezugsebene dieses Bereichs abhängt.

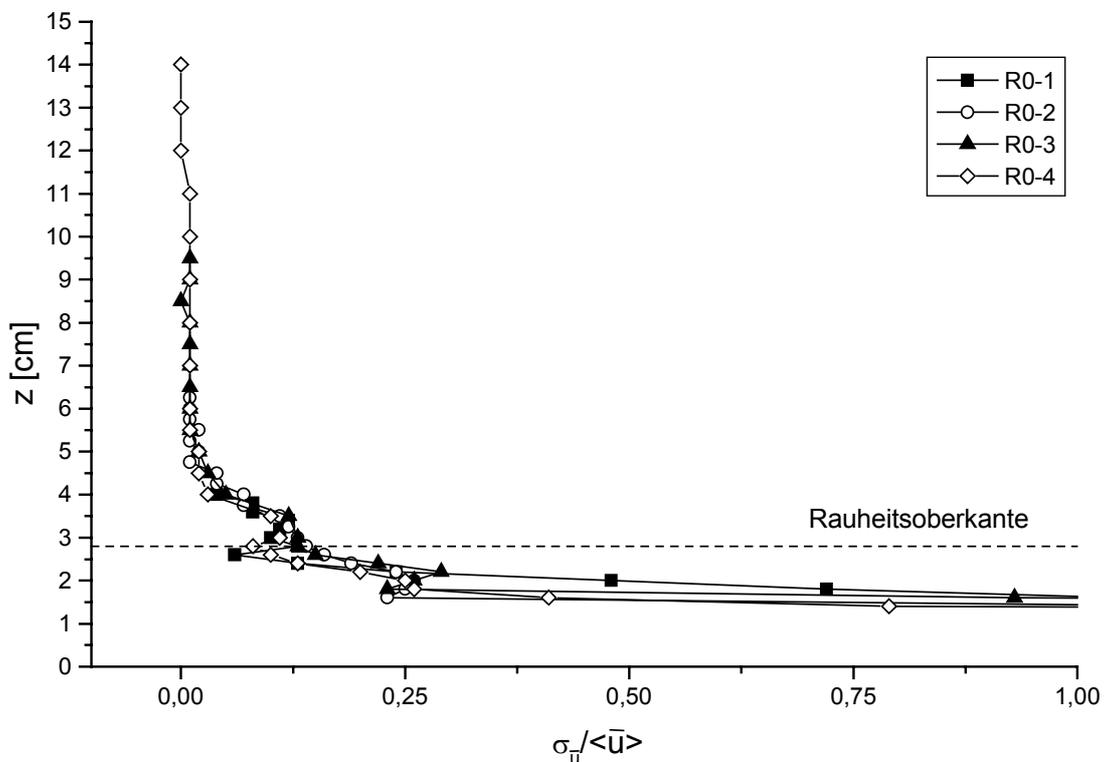


Abb. 3.32 Normierte Standardabweichung der doppelt gemittelten Geschwindigkeitsprofile der Versuchsreihe R0

Zu den leeren Zellen in Tab. 3.4 sei folgendes angemerkt:

Mit dem in Versuch RK-bil verwendeten Laser konnte nicht zwischen den Elementen gemessen werden, so dass keine Daten für die zweite forminduzierte Unterschicht vorliegen. Die obere Grenze der ersten forminduzierten Unterschicht z_R konnte dennoch bestimmt werden, da sie oberhalb der Rauheitselemente liegt.

Im ersten Versuch der Reihe RIII lag im Messbereich, der 6 cm unterhalb des Wasserspiegels endete, kein logarithmisches Profil vor, vermutlich aufgrund der Kombination aus Sohlenrauheit und relativer Überdeckung.

Die Anzahl der Messvertikalen der Versuchsreihe RF ist für die sehr unregelmäßige Rauheit im Bereich der zweiten forminduzierten Unterschicht so gering, dass auf eine Auswertung verzichtet wurde.

Tab. 3.4 Parameter der zweiten und ersten forminduzierten Unterschicht sowie der logarithmischen Schicht

Rauheit	z_{R2} cm	u_{R2} cm/s	l_{R2} cm	z_R cm	u_R cm/s	l_R cm	C -	z_L cm	κ -	d cm	u^* cm/s
RK-bil (L1)				1,03	29,35		5,23	2,73	0,33	0,59	5,62
RK-bs (L2)	0,63	12,33	0,21	0,93	37,59	0,07	6,68	3,03	0,42	0,61	5,63
RK-cw (L2)	0,70	10,44	0,59	0,90	27,40	0,07	4,85	3,00	0,36	0,58	5,65
RK-cw (L3)	0,50	9,95	0,42	0,90	29,66	0,11	5,30	2,80	0,35	0,48	5,60
RK-cd (L3)	0,60	1,64	1,10	0,80	28,03	0,04	5,02	2,80	0,42	0,66	5,58
R0-1	1,40	2,01	4,88	2,80	31,28	0,43	3,43	4,00	0,25	0,91	9,13
R0-2	1,40	2,73	3,43	3,25	41,18	0,39	5,08	5,25	0,19	0,38	8,11
R0-3	1,40	1,66	4,52	3,00	33,68	0,32	5,18	5,50	0,21	1,13	6,50
R0-4	1,40	2,16	3,13	3,00	28,91	0,32	5,33	7,00	0,26	1,66	5,42
RI-1	1,10	-2,97	7,39	2,70	25,89	0,30	4,69	4,40	0,23	0,55	5,52
RI-2	1,60	6,44	0,82	2,80	32,00	0,28	5,23	4,80	0,22	0,34	6,11
RI-3	1,40	3,76	0,96	2,70	35,96	0,28	5,19	5,40	0,25	0,61	6,93
RI-4	1,50	7,40	0,88	2,70	43,72	0,25	5,73	6,40	0,29	1,04	7,63
RI-5	1,20	0,55	2,04	2,80	43,18	0,31	5,10	7,50	0,35	0,72	8,47
RII-1	1,70	7,63	0,55	2,60	27,01	0,25	5,04	4,40	0,31	1,29	5,36
RII-2	1,20	2,56	0,74	2,80	34,30	0,29	5,69	5,00	0,25	0,97	6,03
RII-3	1,50	9,62	0,67	2,60	38,92	0,26	5,46	5,60	0,22	0,17	7,13
RII-4	1,40	9,90	0,60	2,40	36,77	0,28	4,73	6,00	0,28	0,97	7,78
RII-5	1,50	10,20	0,80	2,40	35,99	0,29	4,27	6,80	0,36	1,13	8,44
RIII-1	1,50	2,52	0,96	5,00	43,50	0,48	7,63				5,70
RIII-2	1,50	1,39	0,91	4,80	41,89	0,46	7,53	6,60	0,35	2,94	5,56
RIII-3	1,10	1,48	0,58	4,40	49,79	0,45	7,36	7,00	0,27	1,89	6,77
RIII-4	1,20	4,23	0,63	4,60	56,52	0,48	7,53	8,00	0,31	2,31	7,51
RIII-5	1,10	1,41	0,75	4,60	52,32	0,57	6,38	9,00	0,38	2,30	8,21
RF-1	2,49	25,91		7,69	87,72	0,82	8,60	11,19	0,52	4,96	10,20
RF-2	2,69	22,75		7,79	77,62	1,14	6,27	13,69	0,60	3,90	12,39

Die Parameter der einzelnen Schichten der Wandregion wurden hinsichtlich ihrer Abhängigkeit von Größen untersucht, die die Rauheitsgeometrie (k , z_{bm} , σ_k , c_K') und die hydraulische Wirkung der Sohle (h/k , Re_*) charakterisieren. Die Versuche wurden bei voll ausgebildeter turbulenter Strömung mit Froude-Zahlen durchgeführt, die in einem engen Bereich variierten. Der Einfluss von Re und Fr wurde also nicht explizit untersucht. Obwohl die Verhältnisse von Gerinnebreite B_R zu Fließtiefe h deutlich kleiner als 5 waren, konnte mit Ausnahme für die von Kármán Konstante κ kein Einfluss von B_R/h auf die Parameter festgestellt werden, da die Rauheit der Wände im Vergleich zur Rauheit der Sohlen sehr gering war. In vielen der untersuchten Abhängigkeiten ist eine deutliche Gruppierung entsprechend der verwendeten Rauheitselemente (Glaskugeln und Würfel, Kies, Flussrauheit) vorhanden, die den bisher nicht parametrisierten Formeinfluss widerspiegelt.

Der Vergleich mit in der Literatur vorhandenen Daten ist nicht möglich, da gezielte Untersuchungen der Rauheitsschichten nur sehr selten sind. Weiterhin ist eine Aufbereitung veröffentlichter Daten entsprechend der hier verwendeten Methodik nicht möglich, da entscheidende Daten zur Reanalyse fehlen. So veröffentlichten beispielsweise NOWELL & CHURCH (1979) keine Angaben zu u_* und KIRKGÖZ (1989) gab die zur erneuten Berechnung der Sohlschubspannungsgeschwindigkeit erforderliche Neigung der Sohle oder des Wasserspiegels nicht an.

3.5.1 Parameter der zweiten forminduzierten Unterschicht

Die Darstellung der nach Gl. (3.11) berechneten Geschwindigkeitsprofile in dimensionsloser Form (Abb. 3.33) bestätigt die Existenz einer zweiten forminduzierten Unterschicht. Der in Abb. 3.34 dargestellte Ausschnitt zeigt jedoch keine gute Übereinstimmung der in verschiedenen Versuchsanordnungen gemessenen Profile. Funktionalitäten mit Rauheitsparametern, hydraulischen Kenngrößen und den Parametern der ersten forminduzierten Unterschicht konnten nicht festgestellt werden. Gegen die zur Herleitung von Gl. (3.11) angenommene Linearität des Geschwindigkeitsprofils spricht, dass unabhängig von der Rauheitsdichte die berechnete Mischungsweglänge teilweise größer als die Rauheitshöhe ist. Aufgrund der sehr hohen Diversität der Strömung in der zweiten forminduzierten Unterschicht ist eine wesentlich höhere Anzahl von Messpunkten zur räumlichen Mittelung erforderlich, als sie hier gegeben war.

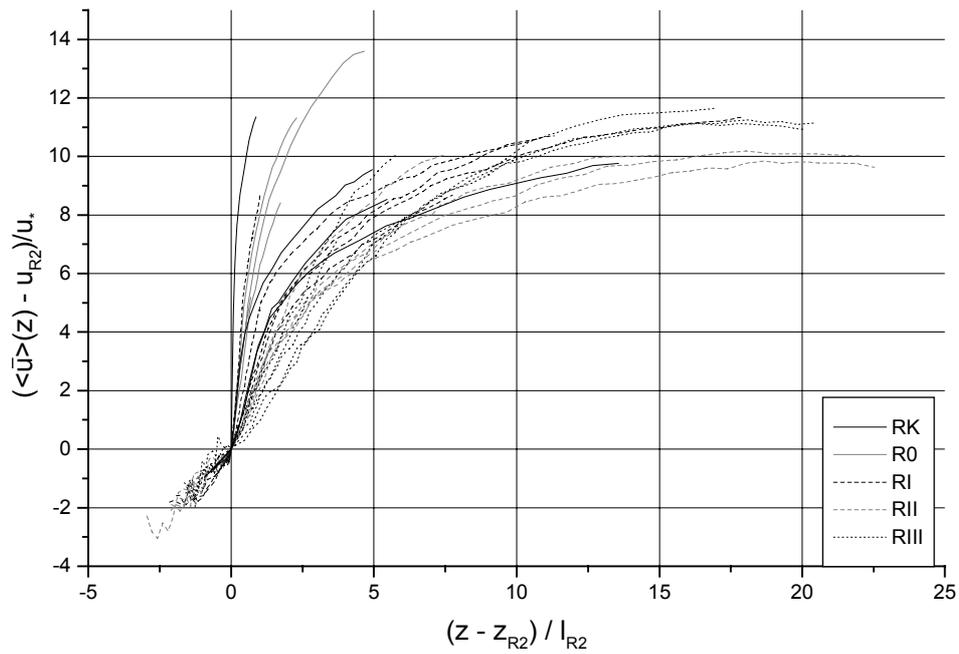


Abb. 3.33 Mit den Parametern der zweiten forminduzierten Unterschicht normierte Geschwindigkeitsprofile

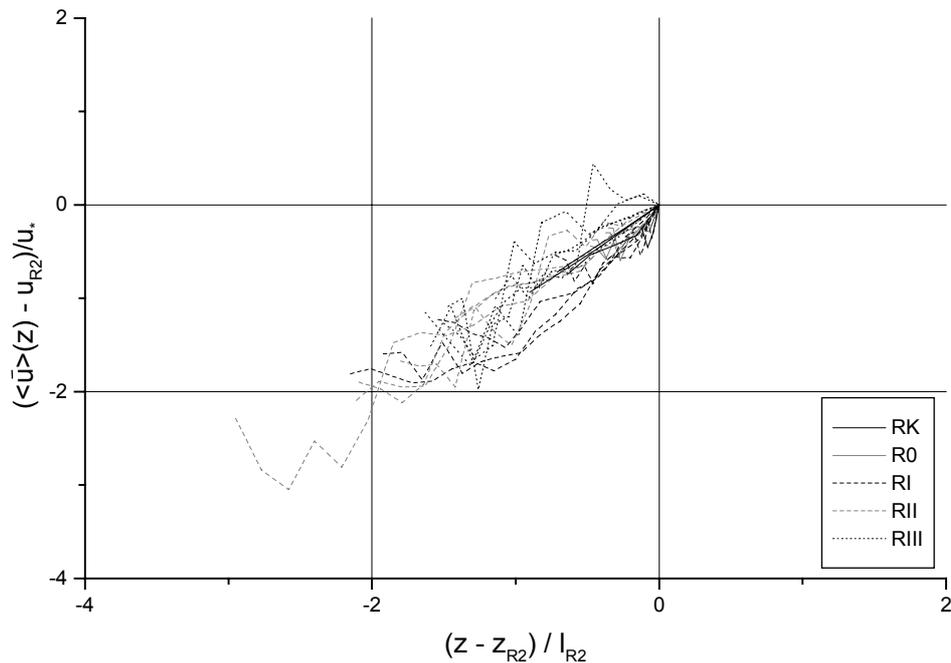


Abb. 3.34 Ausschnitt der normierten Geschwindigkeitsprofile der zweiten forminduzierten Unterschicht

3.5.2 Parameter der ersten forminduzierten Unterschicht

Die Auftragung der dimensionslosen Geschwindigkeit über die normierte Tiefe nach Gl. (3.12) ist in den Abbn. 3.35 und 3.36 dargestellt. Beide Abbildungen verdeutlichen die sehr gute Übereinstimmung der bei verschiedenen relativen Überdeckungen über unterschiedlichen Rauheiten gemessenen Profile. Hieraus folgt, dass die zur Herleitung von Gl. (3.12)

getroffene Annahme eines linearen Geschwindigkeitsprofils in der ersten forminduzierten Unterschicht gültig und die Mischungsweglänge für eine gegebene Rauheit konstant ist.

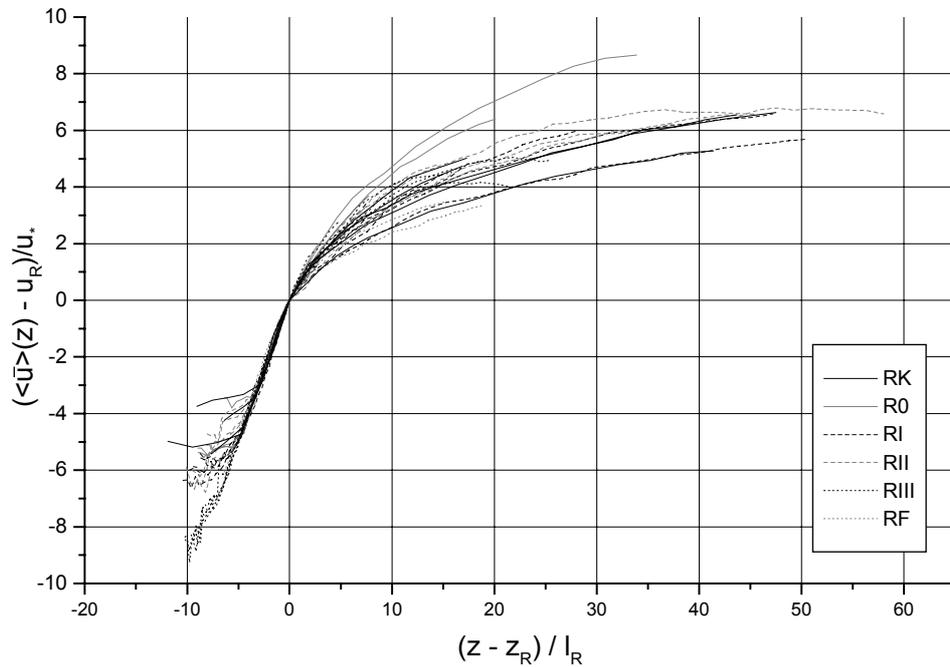


Abb. 3.35 Mit den Parametern der ersten forminduzierten Unterschicht normierte Geschwindigkeitsprofile

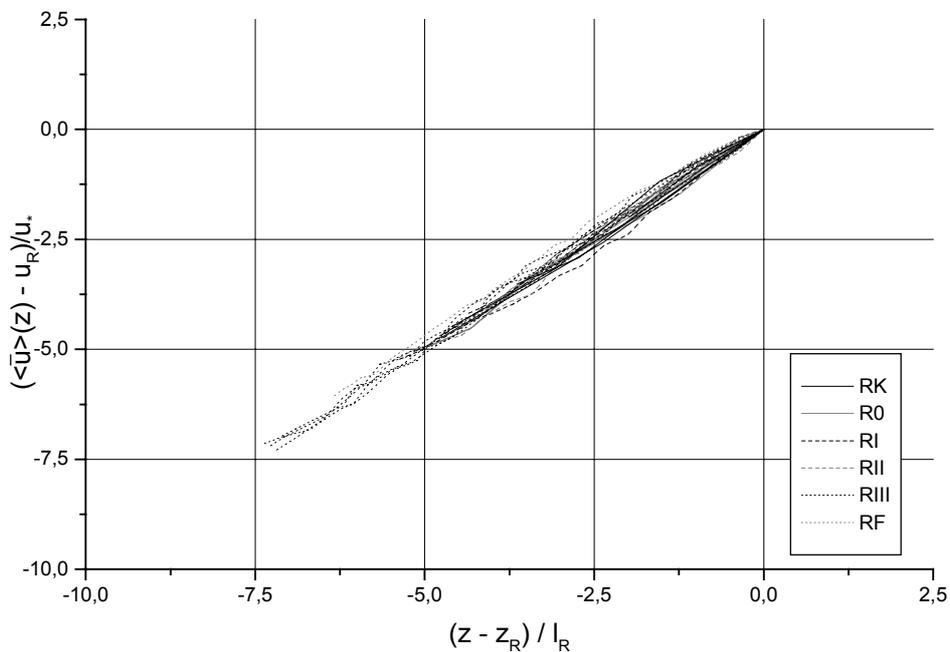


Abb. 3.36 Ausschnitt der normierten Geschwindigkeitsprofile der ersten forminduzierten Unterschicht

Die Mischungsweglänge l_R steigt linear mit der Rauheitshöhe, die in Abb. 3.37a durch k repräsentiert ist. Die Streubreite von l_R für die einzelnen Rauheiten ist dabei weder auf die Wassertiefe noch auf die Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit zurückzuführen, wie die

Auftragung von l_R als Funktion der relativen Überdeckung in Abb. 3.37b und des Verhältnisses l_R/k als Funktion von Re_* in Abb. 3.38 zeigt. Die Größe von l_R nimmt Werte zwischen 5 und 16 % der Rauheitshöhe an und beträgt im Mittel 12 % von k .

Da l_R für eine Sohlenrauheit annähernd konstant ist und mit der Rauheitshöhe steigt, nimmt die Wirbelviskosität $\nu_R = l_R \cdot u_*$ mit Re_* zu (Abb. 3.38), wobei sie für die sehr gleichmäßigen Rauheitsanordnungen der Versuchsreihe RK mit 0,32 bis 0,62 cm^2/s am kleinsten und für die sehr unregelmäßige Rauheit RF mit 8,39 und 14,10 cm^2/s am größten ist.

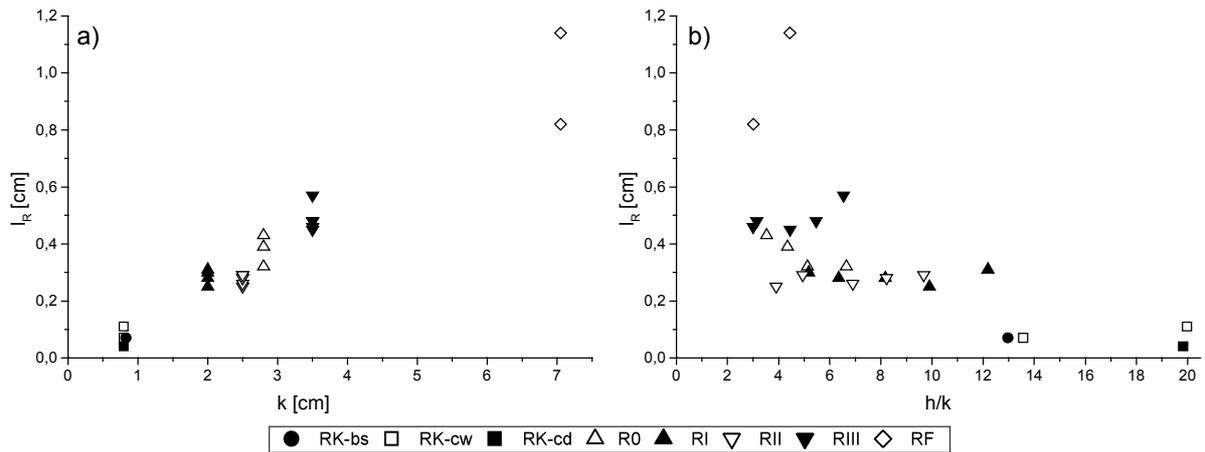


Abb. 3.37 Abhängigkeit der Mischungsweglänge l_R a) von der absoluten Rauheitshöhe k und b) von der relativen Überdeckung h/k

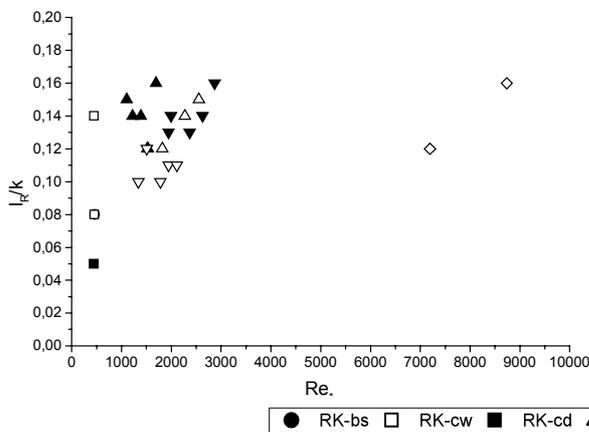


Abb. 3.38 Zusammenhang zwischen l_R/k und der Korn-Reynolds-Zahl Re_*

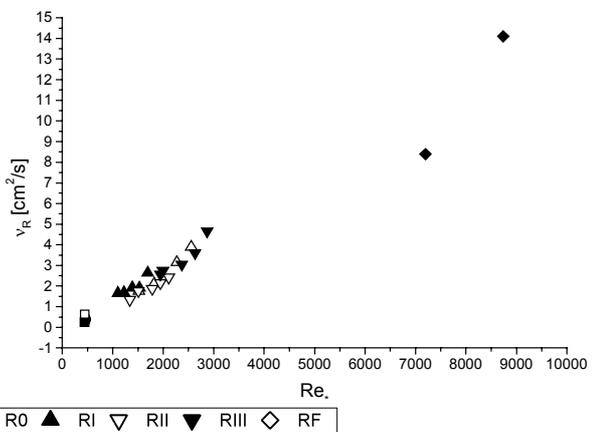
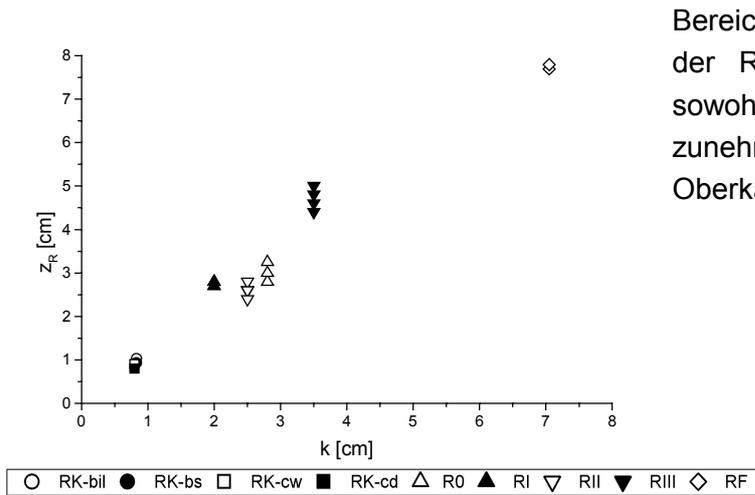


Abb. 3.39 Zusammenhang zwischen der Wirbelviskosität ν_R und der Korn-Reynolds-Zahl Re_*

Die obere Grenze der Rauheitsschicht z_R erweist sich als alleinige Funktion geometrischer Rauheitsparameter, wenn sie, wie hier geschehen, anhand des mittleren Geschwindigkeitsprofils bestimmt wird. Bedingt durch Wirbelablösungen an den einzelnen Elementen wirkt sich die Rauheit bis über ihre Oberkante aus, d.h. z_R ist größer als k (Abb. 3.40). Die zu erwartende Abhängigkeit der Lage der Rauheitsschicht von der Unebenheit der Rauheitsoberfläche kann anhand dieser Versuche jedoch nicht bestätigt werden (Abb. 3.41a). Die Auswirkung der Rauheitsdichte zeigt sich nach Normierung von z_R mit k (Abb. 3.41b), wonach z_R im



Bereich mittlerer Werte von c_K' dicht an der Rauheitsoberkante liegt und sich sowohl mit abnehmender als auch mit zunehmender Rauheitsdichte von der Oberkante entfernt.

Abb. 3.40 Zusammenhang zwischen der Höhe der Rauheitsschicht z_R und der absoluten Rauheitshöhe k

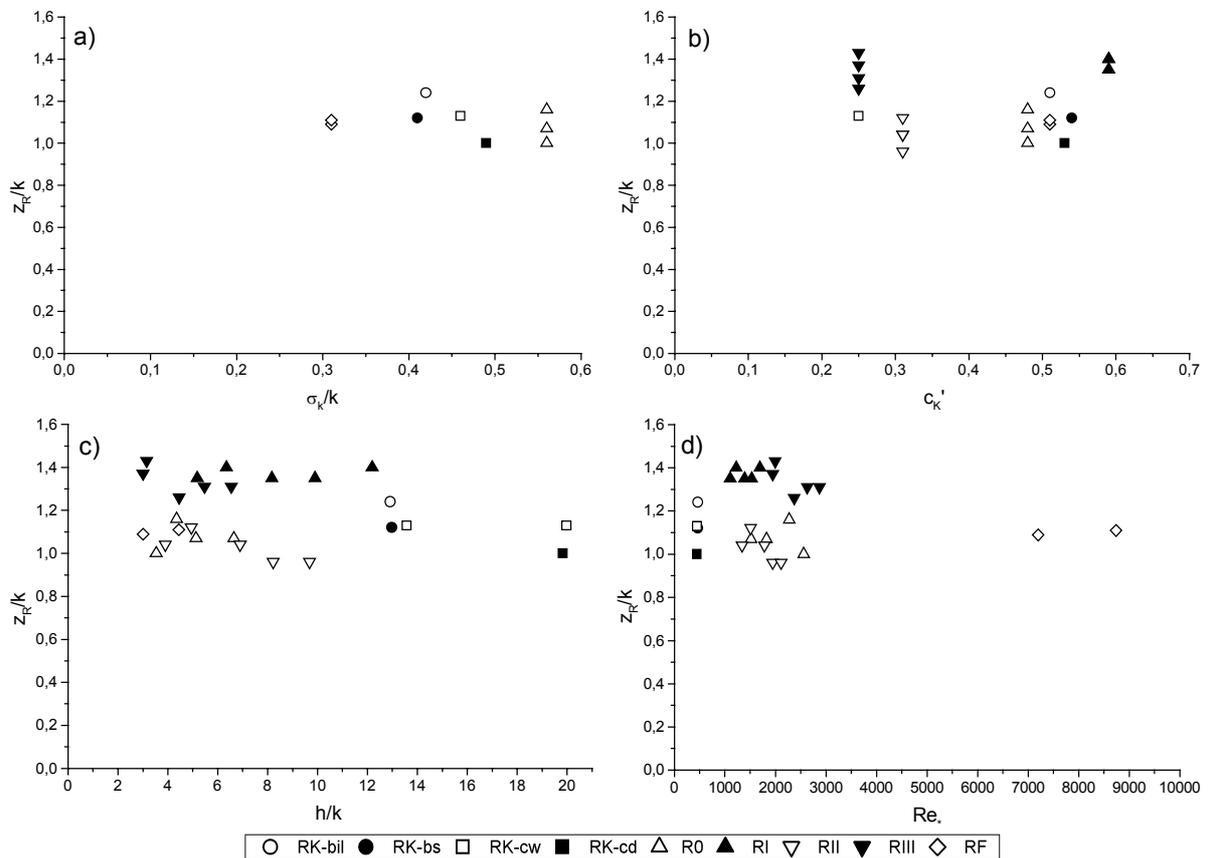


Abb. 3.41 Abhängigkeit des Verhältnisses z_R/k a) von der Unregelmäßigkeit der Rauheitsoberfläche σ_k/k , b) von der Rauheitsdichte c_K' , c) von der relativen Überdeckung h/k und d) von der Korn-Reynolds-Zahl Re_*

Aufgrund der Unabhängigkeit der normierten Grenze zwischen Rauheitsschicht und logarithmischer Schicht von der relativen Überdeckung und der Korn-Reynolds-Zahl (Abbn. 3.41c und 3.41d) kann z_R als neues Maß für die Rauheitshöhe verwendet werden. Der Vorteil liegt darin, dass z_R im Gegensatz zu k kein absolutes Längenmaß ist, das eine feste Sohle als Bezugsniveau erfordert. Damit ist im besonderen in Untersuchungen der Strömung über Po-

renkörpern die Sohlenrauheit einheitlich bestimmbar. Weiterhin kann die bei unregelmäßigen Rauheiten bis zu einem gewissen Maße willkürliche Festlegung der Rauheitshöhe k vermieden werden, da z_R aus dem Geschwindigkeitsprofil ermittelt wird. Dieser Vorteil geht verloren, wenn z_R aus der relativen Turbulenzintensität bestimmt wird, da $(\sigma_u/u^*)_{\max}$ von der relativen Überdeckung abhängt (vgl. Abb. 3.6). Neben der hier vorgenommenen Optimierung von Regressionsgeraden zur Bestimmung von z_R bietet die Standardabweichung der doppelt gemittelten Geschwindigkeiten bei ausreichender Messdichte ein weiteres geeignetes Verfahren. Bevor z_R jedoch, unabhängig vom Geschwindigkeitsprofil, als einziger die Rauheit beschreibender Parameter verwendet werden kann, ist die detaillierte Erfassung der Sohlenrauheit erforderlich.

Die in der Höhe z_R herrschende Geschwindigkeit u_R wurde unter Verwendung der Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit als *Integrationskonstante* $C = u_R/u^*$ definiert (Gl. 3.18). Trotz der relativ großen Streubreite kann eine Abhängigkeit der Konstanten von der relativen Überdeckung festgestellt werden (Abb. 3.42a). C nimmt mit steigender relativer Überdeckung im untersuchten Bereich von $h/k = 3$ bis 20 zunächst ab und erreicht ab $h/k \approx 8$ einen Wert von ca. 5. Die Integrationskonstante nimmt also nicht den Wert 8,5 an (vgl. Kap. 3.2.4.1), wenn sie aus der Randbedingung an der oberen Grenze der Rauheitsschicht bestimmt wird. Wird zur Berechnung der Rauheitsdichte c_k' anstelle der absoluten Rauheitshöhe k das neue Rauheitsmaß z_R verwendet, deutet sich ein Einfluss der Rauheitsdichte auf die Größe von C an (Abb. 3.42b). Demnach nimmt C mit dichter werdender Anordnung der Rauheitselemente zunächst ab und steigt, nach Erreichen eines Minimums, möglicherweise mit weiter zunehmender Rauheitsdichte wieder an.

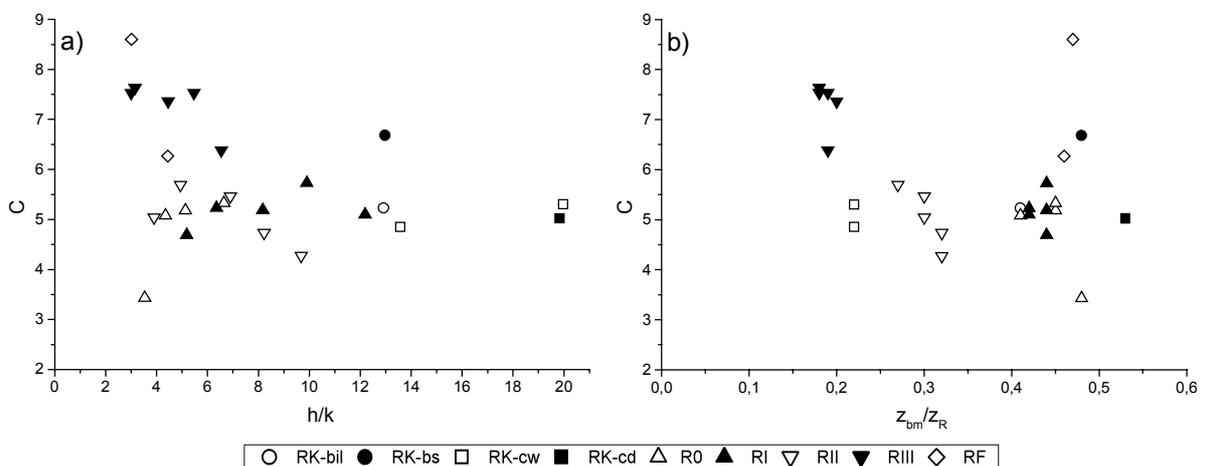


Abb. 3.42 Abhängigkeit der Integrationskonstanten $C = u_R/u^*$ a) von der relativen Überdeckung h/k und b) von der Rauheitsdichte z_{bm}/z_R

Sowohl die Höhe der Rauheitsschicht z_R als auch die Mischungsweglänge der ersten forminduzierten Unterschicht l_R sind für die hier vorliegenden Versuche allein aus der Rauheitsgeometrie bestimmbar und unabhängig von Eigenschaften der Strömung. Damit kann z_R als neues Rauheitsmaß, das im Gegensatz zu der absoluten Rauheitshöhe k unabhängig von einem festen Bezugsniveau ist, verwendet werden.

3.5.3 Parameter der logarithmischen Schicht

Die Berechnung der Parameter basiert auf der in Kap. 3.3 vorgestellten neuen Interpretation des Bezugsniveaus der logarithmischen Schicht als Fühlebene der großen Wirbel, die weder die Universalität der von Kármán Konstante noch die Konstanz der Integrationskonstanten voraussetzt. Weiterhin stehen abhängig von der Rauheitsart zwei Ansätze zur Berechnung des Geschwindigkeitsprofils zur Verfügung: nach Option 1 besteht kein Einfluss der Rauheitsschicht auf den logarithmischen Bereich (Gl. 3.16a), nach Option 2 stören Ablösungen an Rauheitselementen das logarithmische Geschwindigkeitsprofil (Gl. 3.16b). Die Werte der Proportionalitätskonstanten κ und des vertikalen Versatzes d werden von der Wahl der Option nicht beeinflusst.

Abb. 3.43 zeigt am Beispiel der Versuchsreihe R0, dass die nach der neuen Methode bestimmten Parameter die Geschwindigkeitsprofile besser normieren als die CLAUSER-Methode.

Abb. 3.44 zeigt die nach Gl. (3.16a) resp. (3.16b) normierten Geschwindigkeitsprofile unter Verwendung der neuen Definition, d.h. mit variablem, aus den Messungen bestimmtem κ (siehe Tab. 3.4). Zur Verdeutlichung der Ergebnisse ist der Rauheitsbereich nicht dargestellt. Durch die Normierung wird eine sehr gute Übereinstimmung der über unterschiedlichen Rauheiten bei verschiedenen relativen Überdeckungen gemessenen Geschwindigkeiten erzielt, wobei die Vernachlässigung des Rauheitseinflusses eine bessere Übereinstimmung liefert als seine Berücksichtigung. Der Vergleich mit Abb. 3.45, in der $\kappa = 0,4$ gesetzt und d nach der CLAUSER-Methode (siehe Abb. 3.15) bestimmt wurde, verdeutlicht nochmals die verbesserte Normierung.

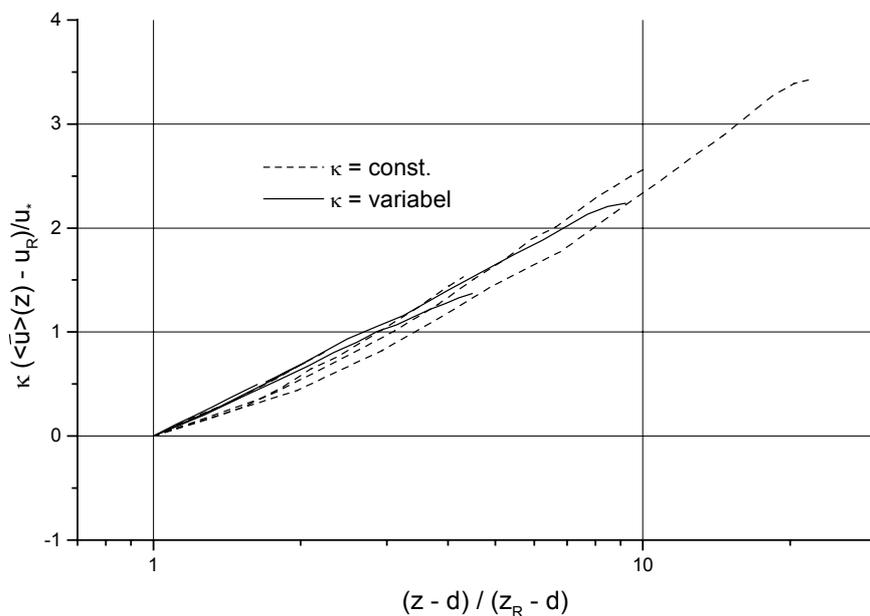


Abb. 3.43 Vergleich $\kappa = \text{variabel}$ mit $\kappa = \text{const.}$ für R0

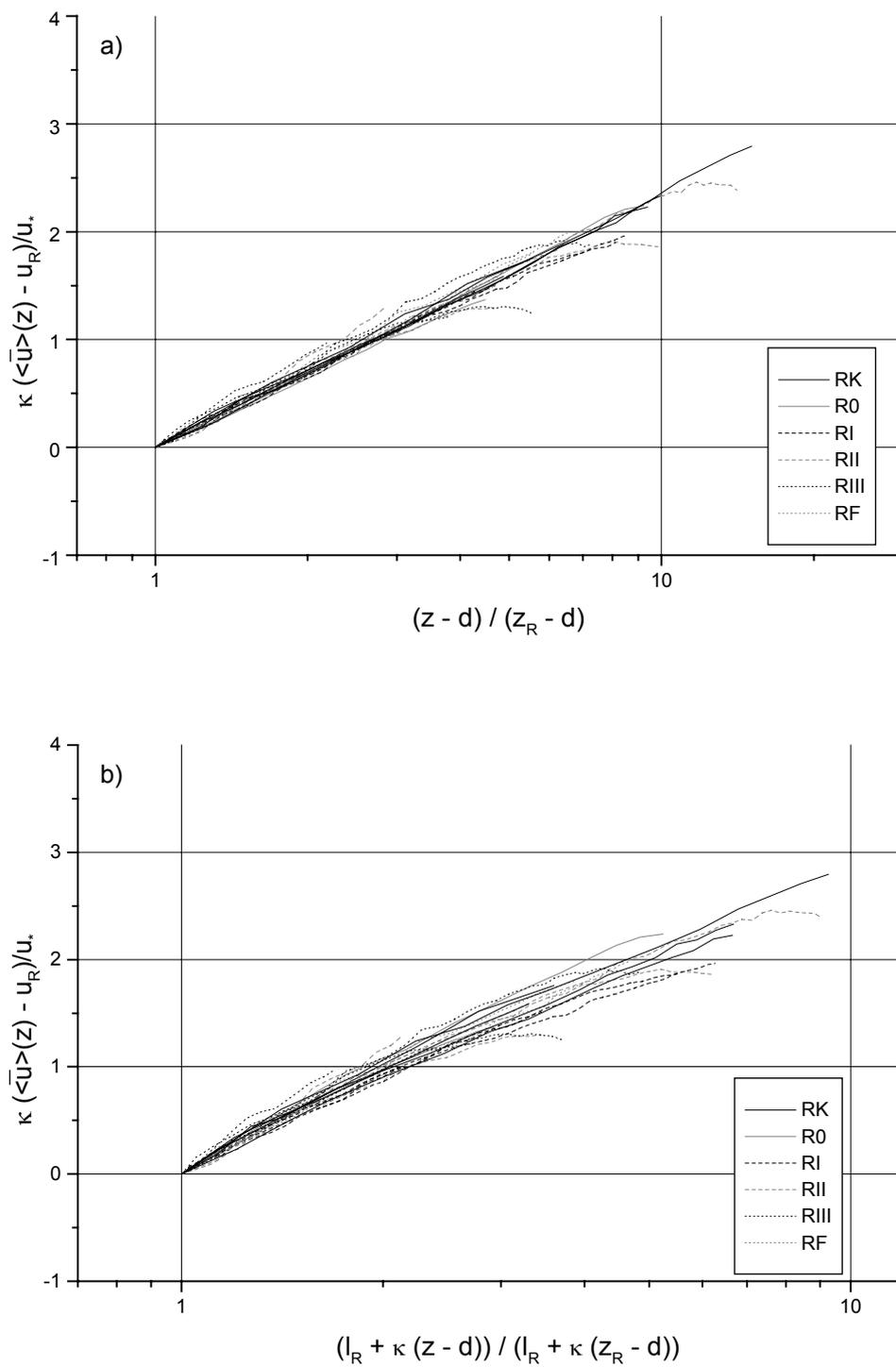


Abb. 3.44 Normierte Geschwindigkeitsprofile a) nach Option 1 (v_R vernachlässigt, κ = variabel) und b) nach Option 2 (v_R berücksichtigt, κ = variabel)

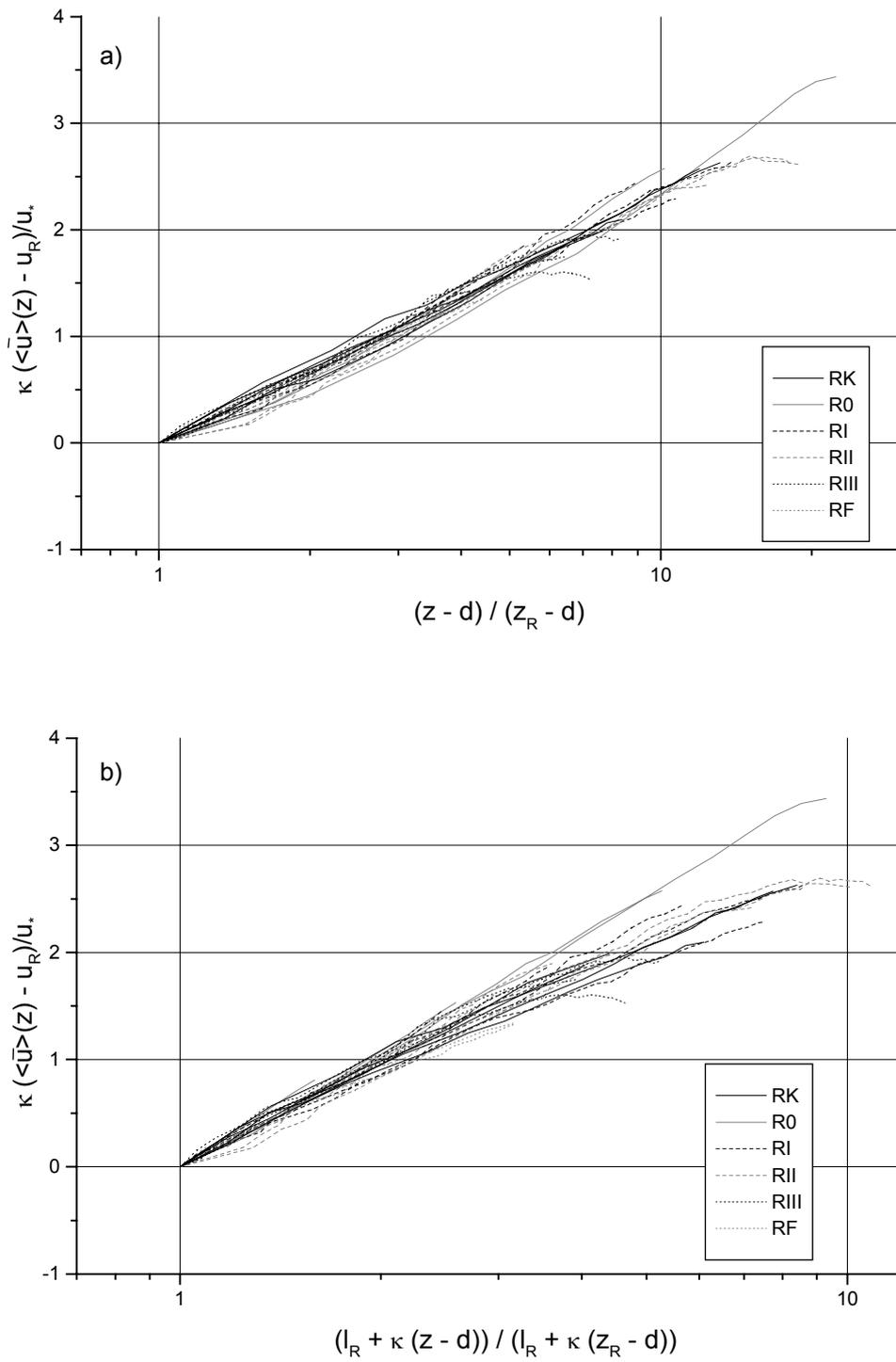


Abb. 3.45 Normierte Geschwindigkeitsprofile a) nach Option 1 (v_R vernachlässigt, $\kappa = \text{const.}$) und b) nach Option 2 (v_R berücksichtigt, $\kappa = \text{const.}$)

Nach der neuen Definition berechnet, weist der *vertikale Versatz* d eine Abhängigkeit von der absoluten Rauheitshöhe k (Abb. 3.46a) und aufgrund des oben gezeigten Zusammenhangs zwischen k , l_R und z_R auch von den letzten beiden Parametern auf. Werden, unabhängig von der Sohlenrauheit, alle Versuche betrachtet, dann nimmt d mit steigendem h/k ab, wie Abb. 3.46b zeigt, d.h. die Bezugsebene der logarithmischen Schicht scheint mit steigender relativer Überdeckung tiefer in die Rauheitsschicht vorzurücken. Wird jedoch nur eine Sohlenrauheit, z.B. RI, betrachtet, dann ist kein Zusammenhang zwischen d und h/k ersichtlich, wie die Normierung von d mit k verdeutlicht (Abb. 3.47a). Da auch kein Einfluss von Re_* auf die Größe des vertikalen Versatzes festzustellen ist (Abb. 3.47b), liegt die Vermutung nahe, dass d unabhängig von der Strömung ist. Die beträchtliche Streuung von d , dessen Wert zwischen 7 und 84 % der Rauheitshöhe beträgt, ist somit derzeit nicht erklärbar. Die Normierung von d mit z_R bzw. l_R liefert aufgrund der linearen Zusammenhänge zwischen k , z_R und l_R vergleichbare Ergebnisse.

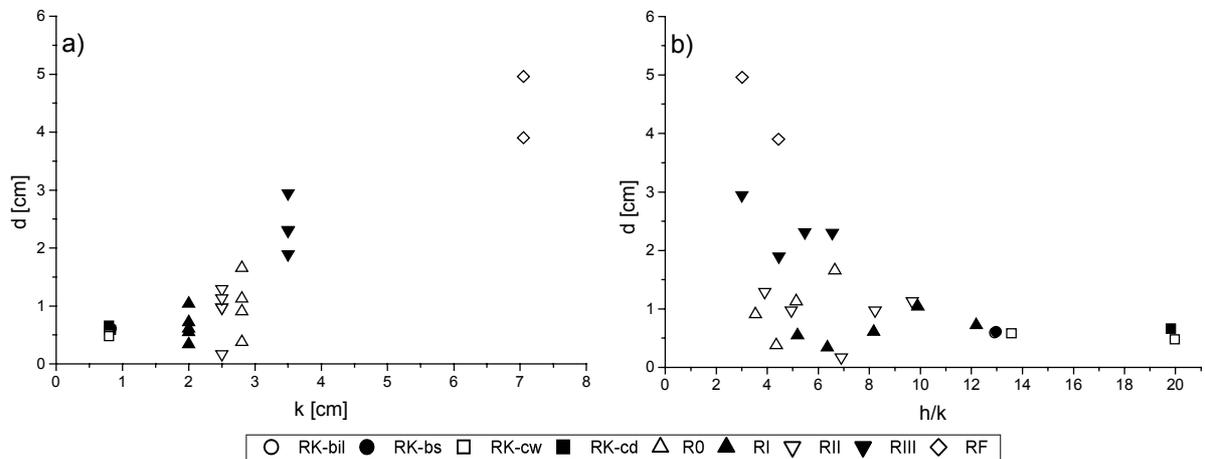


Abb. 3.46 Abhängigkeit des vertikalen Versatzes d a) von der absoluter Rauheitshöhe k und b) von der relativen Überdeckung h/k

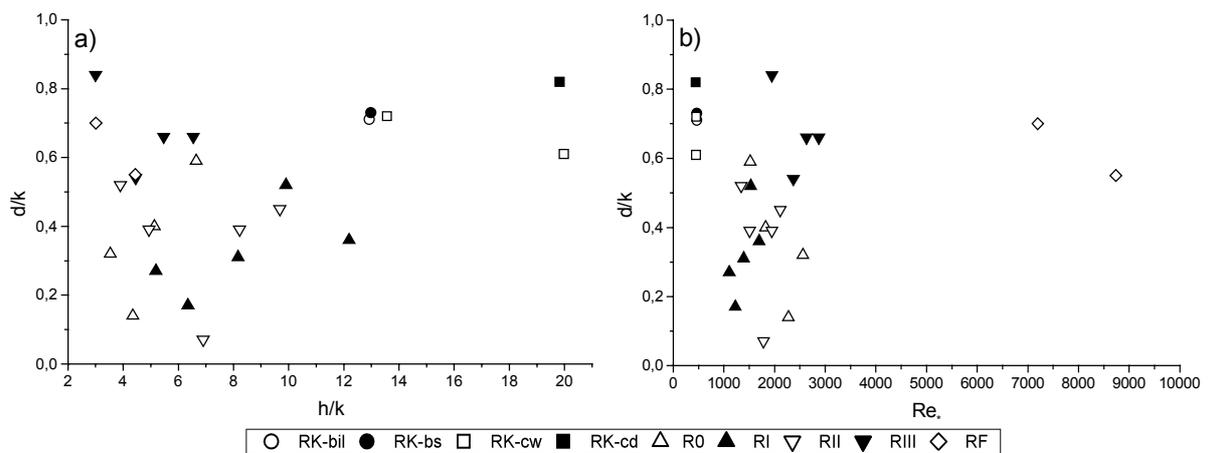


Abb. 3.47 Abhängigkeit des Verhältnisses d/k a) von der relativen Überdeckung h/k und b) von der Korn-Reynolds-Zahl Re_*

Aufgrund der neuen Definition der Bezugsebene für die Wirbel des logarithmischen Bereichs ist die Steigung des Geschwindigkeitsprofils, die durch die *von Kármán Konstante* κ charak-

terisiert wird, nicht konstant, sondern variiert für die Versuche RK und R0 bis RIII zwischen den Werten 0,19 und 0,42 (vgl. Tab. 3.4), wobei die maßgeblich beeinflussende Größe die Wassertiefe ist (Abb. 3.48a). Die κ -Werte der Versuchsreihe RF liegen mit 0,52 und 0,6 deutlich über diesem Bereich. Damit ist κ weiterhin eine Funktion der relativen Überdeckung (Abb. 3.48b) und dem Verhältnis von Breite zu Tiefe (Abb. 3.48c). κ steigt mit zunehmender Wassertiefe und folglich auch mit zunehmendem h/k resp. abnehmendem B_R/h . Mit steigender relativer Überdeckung nähert sich κ asymptotisch dem für Klarwasserabfluss über glatten Sohlen gültigen Wert 0,4, der bei $h/k \approx 13$ erreicht wird. Der Einfluss des Breiten/Tiefenverhältnisses scheint abhängig von h/k zu sein. Für die Darstellung wurde die Tiefe h verwendet, wobei Gleiches auch für die Wassertiefen z_{\max} und h_m (Definition siehe Abb. 3.2) gilt. In die Berechnung der Korn-Reynolds-Zahl geht h nur in der Wurzel ein, so dass keine Abhängigkeit erkennbar ist (Abb. 3.48d).

Die Steigung des Geschwindigkeitsprofils wird jedoch nicht nur von der Wassertiefe beeinflusst, sondern auch von der Unregelmäßigkeit der Rauheitsoberfläche, wie die Auftragung von κ über der mit k normierten Standardabweichung der Rauheitserhebungen in Abb. 3.48e zeigt. Demnach ist κ umso kleiner, je größer die Unregelmäßigkeit im Verhältnis zur absoluten Rauheitshöhe ist. Der Zusammenhang zwischen κ und d/k , wonach κ gegen 0,4 strebt, wenn sich die Bezugsebene der logarithmischen Schicht der Rauheitsoberkante nähert, ist in Abb. 3.48f dargestellt. Die Abhängigkeit der von Kármán Konstante von der relativen Überdeckung und der Sohlenoberfläche wird durch die Untersuchungen von KIRKBRIDE (1993), HANDLER ET AL. (1993) und SIROVICH & KARLSSON (1997) bestätigt, wonach die Kohärenz der turbulenten Strömung und damit der Fließwiderstand durch h/k und σ_κ beeinflusst wird (siehe Kap. 3.2.4.3).

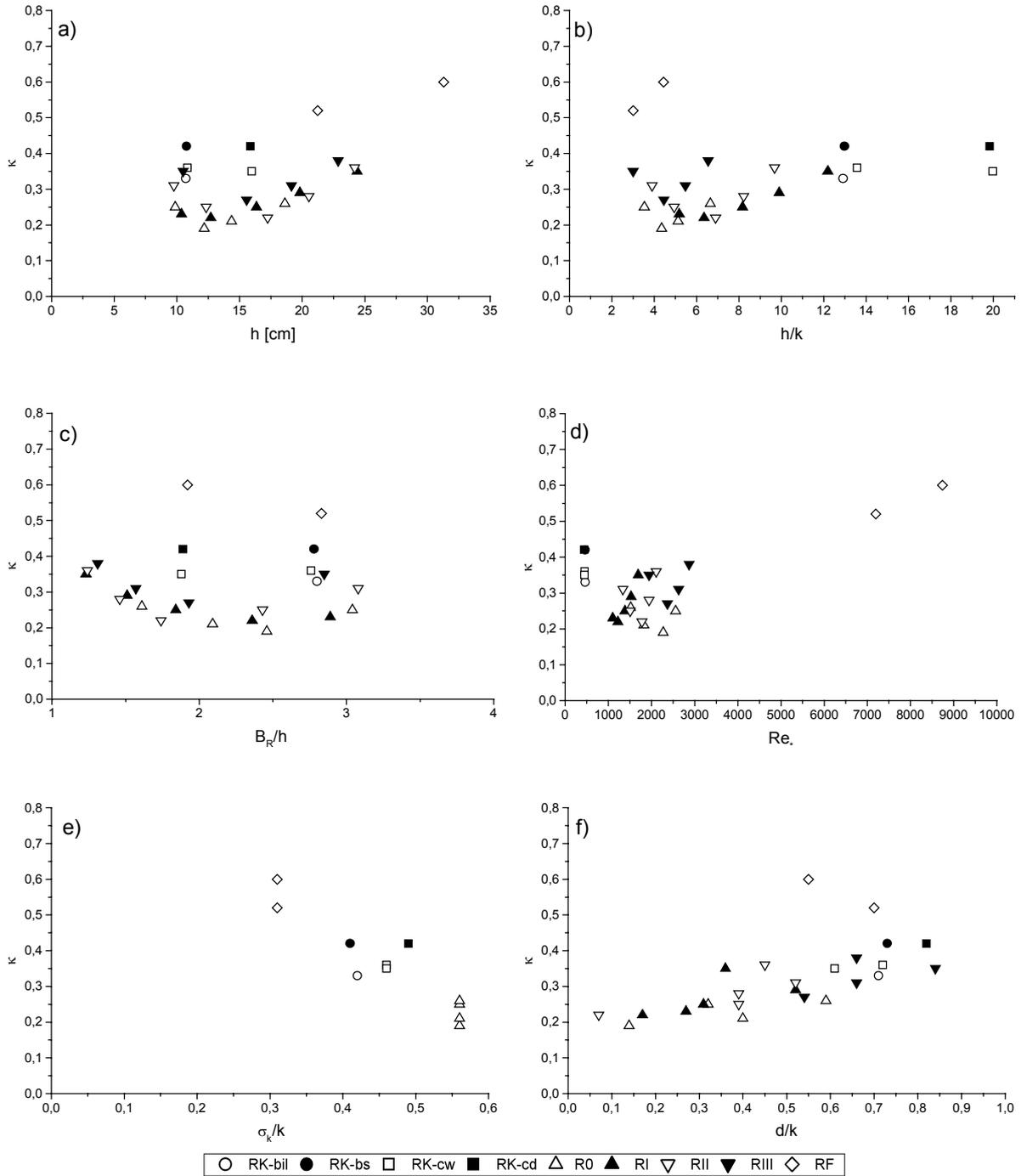


Abb. 3.48 Abhängigkeit der von Kármán Konstante κ a) von der Wassertiefe h , b) von der relativen Überdeckung h/k , c) von dem Breiten-/Tiefenverhältnis B_R/h , d) von der Korn-Reynolds-Zahl Re_* , e) von der Unregelmäßigkeit der Rauheitsoberfläche σ_k/k und f) vom Verhältnis d/k

3.6 Resümee zum turbulenten Geschwindigkeitsfeld über rauen Sohlen

Mit der Aufbereitung der Grundlagen zum vertikalen Geschwindigkeitsfeld konnten die für raue Sohlen bestehenden Schwierigkeiten aufgezeigt werden, wie z.B. die Bestimmung der maßgebenden Rauheitshöhe und eines einheitlichen Bezugsniveaus sowie die Variabilität der von Kármán Konstante. Die der Bezugsebene des logarithmischen Geschwindigkeitsprofils zukommende Bedeutung führte zu einer neuen Definition des vertikalen Versatzes d , die weiterhin eine von der bisherigen Methode abweichende Bestimmung der hydraulischen Rauheit, der Integrationskonstante des logarithmischen Geschwindigkeitsgesetzes und der von Kármán Konstante beinhaltet. Die neue Methode zur Bestimmung der Parameter wurde anhand von Geschwindigkeitsmessungen über unterschiedlichen Sohlenrauheiten bei verschiedenen relativen Überdeckungen überprüft, die in den letzten Jahren am Theodor-Rehbock-Laboratorium durchgeführt worden sind.

Das Bezugsniveau des logarithmischen Bereichs kann der neuen Interpretation zufolge als diejenige Ebene definiert werden, die von den großen Wirbeln der freien Strömung oberhalb der Rauheitselemente als Bezugsebene „gefühl“ wird. Damit wird der vertikale Versatz d nicht länger mit dem Ziel bestimmt, die Steigung des Geschwindigkeitsprofils einem vorgegebenen Wert ($\kappa \approx 0,4$) anzupassen. Statt dessen wird diejenige Höhe als Bezugsniveau verstanden, in der die Mischungsweglänge des logarithmischen Bereichs Null ist. Der vertikale Versatz ist dann die Differenz zwischen dem zunächst willkürlich gewählten Ursprung der vertikalen Koordinate z und der Höhe $z(L = 0)$. Die neue Methode zur Bestimmung der Parameter wurde anhand der verbesserten Übereinstimmung der normierten Geschwindigkeitsprofile bestätigt.

Die Aufbereitung des Wissensstandes zeigte, dass der Fließwiderstand und damit der Geschwindigkeitsgradient maßgeblich von der Kohärenz der turbulenten Strömung bestimmt werden. Während bei Klarwasserabfluss über glatten Sohlen die von Kármán Konstante unabhängig von der Wassertiefe zu $\kappa \approx 0,4$ gesetzt werden kann, unterdrückt über rauen Sohlen eine im Verhältnis zur Rauheitshöhe geringe Wassertiefe die Ausprägung der turbulenten kohärenten Strukturen. Weiterhin behindert eine unregelmäßige Sohlenrauheit die Ausbildung von low-speed streaks, die als der Ursprung der kohärenten Strukturen angesehen werden.

Die untersuchten Daten bestätigen die Abhängigkeit der von Kármán Konstante von der Wassertiefe, im besonderen von der relativen Überdeckung, und von der Unregelmäßigkeit der Rauheitsoberfläche. Mit steigendem h/k im untersuchten Bereich von 3 - 20 nimmt κ von 0,19 bis 0,42 zu. Die Versuchsreihe RF weist mit $\kappa = 0,52$ und 0,6 deutlich höhere Werte auf. Die Auftragung von κ über die mit der absoluten Rauheitshöhe k normierte Standardabweichung der Rauheitserhebungen σ_k verdeutlicht den Einfluss einer unregelmäßigen Rauheitsoberfläche.

Weiterhin konnte die Grenze z_R zwischen Rauheitsschicht und logarithmischer Schicht als neues Rauheitsmaß identifiziert werden. Der Vorteil der Verwendung dieses Maßes anstelle der absoluten Rauheitshöhe k liegt darin, dass es zum einen unabhängig von einem definierten Bezugsniveau ist und zum anderen keine genaue Bestimmung der Rauheitsoberkante erforderlich ist. Somit kann die Rauheit sowohl durchlässiger als auch sehr unregelmäßiger

Sohlen beschrieben werden. Die Versuchsergebnisse deuten darauf hin, dass z_R ebenso wie die Mischungsweglänge der ersten forminduzierten Unterschicht l_R einzig eine Funktion der Rauheitsgeometrie und unabhängig von Eigenschaften der Strömung sind. Die Linearität des Geschwindigkeitsprofils in der ersten forminduzierten Unterschicht konnte für die untersuchten Rauheiten nachgewiesen werden, womit die in der Literatur zu findende Annahme einer über die Tiefe konstanten rauheitsinduzierten Wirbelviskosität bestätigt wird. Diese Ergebnisse könnten es ermöglichen, die viskose Grenzschicht als Lieferanten der für numerische Programme erforderlichen Randbedingungen im Fall rauer Sohlen, in denen die Grenzschicht praktisch nicht vorhanden ist, durch die erste forminduzierte Unterschicht zu ersetzen. Zuvor sind jedoch weiterführende Untersuchungen schematisierter sowie naturnaher Rauheitsstrukturen erforderlich, um die Ergebnisse verallgemeinern zu können. Im besonderen ist der Einfluss der Durchlässigkeit des Sohlenkörpers auf das Geschwindigkeitsprofil der Rauheitsschicht zu untersuchen.

Die Existenz einer zweiten forminduzierten Unterschicht konnte bestätigt werden. Für eine sichere Auswertung ihrer Parameter war die Messdichte der nicht mit dem Ziel der doppelten Mittelung konzipierten Messprogramme jedoch zu gering. Die genauere Untersuchung dieser Schicht sollte unter Berücksichtigung der Porosität des Sohlenkörpers erfolgen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Eine häufige Aufgabe in der Ingenieurspraxis ist die Abschätzung der bei vorgegebenen Durchflüssen zu erwartenden Geschiebetransportraten und -mengen, um z.B. Speicherbekken dimensionieren oder die Entwicklung von Umgestaltungsmaßnahmen prognostizieren zu können. Die Anwendung existierender Geschiebetransportformeln zeigt für kiesführende Flüsse im allgemeinen keine befriedigende Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung, d.h. das Wissen über die Transportvorgänge ist nicht ausreichend.

Ein bisher kaum beachteter Aspekt ist die Wechselwirkung zwischen einer für kiesführende Flüsse charakteristischen statischen Deckschicht und dem Transport von Geschiebe, das nicht nur in dem betrachteten Abschnitt durch Überschreiten des Strömungsangriffs mobilisiert, sondern auch von oberstrom eingetragen werden kann. Die zentrale Frage dieses in Kap. 2 behandelten Themas ist, ob eine existierende statische Deckschicht durch Materialeintrag von oberstrom geschützt oder zusätzlich belastet wird, und wechselseitig, ob und wie eine durch ausgeprägte Sohlenstrukturen gekennzeichnete statische Deckschicht den Geschiebetransport beeinflusst. Zur Klärung wurden Laborversuche durchgeführt, in denen eingefärbter Kies in einen durch eine statische Deckschicht stabilisierten Abschnitt eingetragen wurde. Aufgrund des gewählten Sohlenmaterials und des steilen Gefällebereichs wies die Sohle neben der Deckschicht ausgeprägte Step-Pool-Strukturen auf.

Die Ergebnisse zeigen, dass trotz maximaler Stabilität der Deckschicht durch den Eintrag von externem Geschiebe stets Sohlenmaterial mobilisiert wird, auch wenn der kritische Durchfluss der statischen Deckschicht nicht überschritten wird. Eine vorhandene Deckschicht wird also nicht durch den Transport von externem Geschiebe geschützt, sondern zusätzlich beansprucht. Die Transportvorgänge sind dabei im wesentlichen vom Verhältnis des kritischen Durchflusses des Zugabematerials und der vorhandenen Deckschicht zum herrschenden Durchfluss sowie von der Zugaberate abhängig. Bezüglich der Stabilität der vorhandenen Deckschicht und der Mobilität des externen Geschiebes kann eine Fallunterscheidung vorgenommen werden (Tab. 2.9, Kap. 2.5). Ingetragenes Material wird zunächst abgelagert, so dass die Sohlenrauheit und -neigung und damit die Fließgeschwindigkeit und der Strömungsangriff in dem Moment verändert werden, in dem Geschiebe in einen Abschnitt gelangt. Abhängig von der Mobilität des externen Geschiebes, d.h. der Korngröße und der Sieblinie, wird die Strömung darüber hinaus durch die bewegten Partikel beschleunigt oder verzögert. Wenn der kritische Durchfluss des Geschiebes bei weitem unterschritten wird, ist die Transportrate des Sohlenmaterials für den Fall sehr gering, dass auch der kritische Durchfluss der Deckschicht unterschritten wird. Die Mobilisierung des Sohlenmaterials erfolgt lokal aufgrund von Änderungen des Strömungsfeldes. Wird hingegen der zur Bewegung der Deckschicht erforderliche Durchfluss überschritten, dann verringert der Eintrag des Grobgeschiebes zwar nicht die Höhe der Transportrate, jedoch die Dauer des Ereignisses. Letztlich wird in diesem Fall aufgrund des Geschiebeeintrags weniger Sohlenmaterial transportiert als bei Klarwasserabfluss. Mit zunehmender Mobilität des eingetragenen Geschiebes steigen die Transportraten und die erodierten Mengen des Sohlenmaterials. Neben den mit höheren Transportgeschwindigkeiten verbundenen häufigeren Änderungen des lokalen Strömungsfeldes bewirken höhere Impulse der Partikel eine zusätzliche Destabilisierung von

Sohlenmaterial. Die in der Literatur zu findende Vermutung (JACKSON & BESCHTA, 1984; HASSAN & CHURCH, 2000), dass aufgrund der Abminderung des maßgebenden Korndurchmessers durch die Vermischung von Sohlen- und Zugabematerial die Stabilität der Sohle verringert wird, kann also nicht als Hauptgrund für den Transport von Sohlenmaterial angesehen werden, zumal eine Vermischung der beiden Materialien nur in einem Langzeitversuch beobachtet werden konnte.

Das Zurückhalten von eingetragenen Geschiebe einerseits und die Mobilisierung von Sohlenmaterial andererseits führen zu starken Schwankungen in den Transportraten und der Kornzusammensetzung des erodierten Materials. Mit andauerndem Eintrag ändert sich dabei der Mittelwert der Schwankungen. Ein mobiles Geschiebegleichgewicht, wie es in den meisten Transportformeln vorausgesetzt wird, liegt nicht vor. Dieser Zustand wird erst bei extrem hohen Zugaberaten oder über lange Zeit konstanten Randbedingungen erreicht. Die Notwendigkeit eines Geschiebegleichgewichts für eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung sowie die Schwierigkeit, ausgehend von der statischen Deckschicht die im mobilen Gleichgewicht vorliegenden Randbedingungen abzuschätzen, konnten mit den Untersuchungen aufgezeigt werden. Die angewendeten Formeln zur Berechnung des Geschiebetransports in Kiesflüssen liefern dementsprechend stark abweichende Ergebnisse bezüglich der gemessenen Transportraten. Bei Verwendung der Formeln von SMART & JÄGGI (1983) und RICKENMANN (1990) nähert sich die berechnete Transportrate der gemessenen erst für den Fall an, dass ein mobiles Gleichgewicht vorliegt.

Während die Änderung der Sohlenneigung durch Ablagerung und Erosion in numerischen Modellen berücksichtigt werden kann, wird die Rauheit im allgemeinen als konstant bzw. als vom Geschiebe abhängig behandelt. Die Berücksichtigung der Rauheit einer vorhandenen Sohle ist vermutlich aufgrund der Voraussetzung eines mobilen Gleichgewichts nicht vorgesehen. Die deutliche Verbesserung der Ergebnisse, die mit dem Ansatz von MEYER-PETER & MÜLLER (1949) erreicht wurde, indem der Parameter (k_{St}/k_r) auf die vor der Zugabe vorhandene Deckschicht bezogen wurde, spricht jedoch für die Berücksichtigung der anfänglichen Sohlenrauheit.

Zur wesentlichen Verbesserung der Berechnungsergebnisse in Gebirgsbächen reicht es also nicht aus, vorhandene Geschiebetransportformeln in numerische Modelle einzuarbeiten, da die meisten Formeln auf idealisierten Randbedingungen basieren und mit der Sohlenrauheit und der Kornbewegung veränderliche Strömungsbedingungen nicht berücksichtigen. Die Frage zu welchem Anteil die Änderungen der Neigung und der Rauheit und auch die Bewegung des Geschiebes an Änderungen der Geschwindigkeit beteiligt sind, muss anhand weiterer Untersuchungen beantwortet werden. Darüber hinaus ist zur Berechnung des Geschiebetransports zunächst die Erweiterung der Kenntnisse des Strömungsfeldes in Abhängigkeit von der Sohlenrauheit und vom Vorhandensein bewegter Partikel erforderlich.

In einem ersten Schritt wurde das sohlennahe Geschwindigkeitsfeld über ebenen, rauen Sohlen unter besonderer Berücksichtigung geringer relativer Überdeckungen untersucht (Kap. 3). Die bestehenden Schwierigkeiten in der Beschreibung des vertikalen Geschwindigkeitsprofils über rauen Sohlen (z.B. Bestimmung der maßgebenden Rauheitshöhe, Festlegung eines einheitlichen Bezugsniveaus, Variabilität der von Kármán Konstante) wurden mit der Aufbereitung der Grundlagen aufgezeigt. Die der Bezugsebene des logarithmischen Ge-

schwindigkeitsprofils zukommende Bedeutung führte zu einer neuen Definition des vertikalen Versatzes d , die darüber hinaus eine von der bisherigen Methode abweichende Bestimmung der hydraulischen Rauheit, der Integrationskonstante des logarithmischen Geschwindigkeitsgesetzes und der von Kármán Konstante beinhaltet. Der vertikale Versatz d , der die Lage des Bezugsniveaus des logarithmischen Geschwindigkeitsbereichs angibt, wird nicht länger mit dem Ziel bestimmt, die Steigung des Geschwindigkeitsprofils einem vorgegebenen Wert ($\kappa \approx 0,4$) anzupassen. Statt dessen wird als Bezugsniveau diejenige Höhe verstanden, in der die Mischungsweglänge des logarithmischen Bereichs Null ist. Der vertikale Versatz ist dann die Differenz zwischen dem zunächst willkürlich gewählten Ursprung der vertikalen Koordinate z und der Höhe $z(l_L = 0)$. Der Fließwiderstand und damit der Geschwindigkeitsgradient werden maßgeblich von der Kohärenz der turbulenten Strömung bestimmt. Während bei Klarwasserabfluss über glatten Sohlen die von Kármán Konstante unabhängig von der Wassertiefe zu $\kappa \approx 0,4$ gesetzt werden kann, behindert eine unregelmäßige Sohlenrauheit die Ausbildung von low-speed streaks, die als der Ursprung der kohärenten Strukturen angesehen werden. Weiterhin unterdrückt über rauen Sohlen eine im Verhältnis zur Rauheitshöhe geringe Wassertiefe die Ausbildung der turbulenten kohärenten Strukturen, so dass bei geringen relativen Überdeckungen und sehr unregelmäßigen Rauheitsoberflächen geringere Fließwiderstände und damit geringere Werte von κ zu erwarten sind.

Anhand von Geschwindigkeitsmessungen, die am Theodor-Rehbock-Laboratorium über unterschiedlichen Sohlenrauheiten bei verschiedenen relativen Überdeckungen durchgeführt worden sind, wurde der Aufbau des vertikalen Geschwindigkeitsprofils untersucht und die zur Berechnung des Profils identifizierten Parameter überprüft. Die Parameter des Geschwindigkeitsprofils wurden in einer umfangreichen Parameterstudie auf Abhängigkeiten von Eigenschaften der Strömung und der Rauheitsgeometrie untersucht. Die Auswertung erfolgte anhand der doppelt (zeitlich und räumlich) gemittelten Geschwindigkeitsprofile.

Die Untersuchungen bestätigen die Unterteilung des vertikalen Geschwindigkeitsprofils in eine aus zwei forminduzierten Unterschichten bestehende Rauheitsschicht und die logarithmische Schicht. Für eine sichere Auswertung der Parameter der zweiten forminduzierten Unterschicht war die Messdichte der nicht mit dem Ziel der doppelten Mittelung konzipierten Messprogramme zu gering. Die Linearität des Geschwindigkeitsprofils in der ersten forminduzierten Unterschicht konnte für die untersuchten Rauheiten nachgewiesen werden, womit die in der Literatur zu findende Annahme einer über die Tiefe konstanten rauheitsinduzierten Wirbelviskosität bestätigt wird. Im besonderen konnte nachgewiesen werden, dass auch bei geringen relativen Überdeckungen ein Bereich existiert, in dem das Geschwindigkeitsprofil logarithmisch verteilt ist.

Die ausgewerteten Daten bestätigen die Abhängigkeit der von Kármán Konstante von der Wassertiefe, im besonderen von der relativen Überdeckung h/k , und von der Unregelmäßigkeit der Rauheitsoberfläche. Im untersuchten Bereich von $h/k = 3 - 20$ nimmt κ von 0,19 bis 0,42 mit steigendem h/k zu. Eine abnehmende Unregelmäßigkeit der Rauheitsoberfläche führt ebenfalls zu einem steigenden κ -Wert.

Als neues Rauheitsmaß konnte die Grenze z_R zwischen der linearen Rauheitsschicht und der logarithmischen Schicht identifiziert werden. Der Vorteil der Verwendung dieses Maßes anstelle der absoluten Rauheitshöhe k liegt darin, dass es zum einen unabhängig von einem

definierten Bezugsniveau ist und zum anderen keine genaue Bestimmung der Rauheitsoberkante erforderlich ist. Somit kann die Rauheit sowohl durchlässiger als auch sehr unregelmäßiger Sohlen beschrieben werden. Die Ergebnisse der Parameterstudie deuten darauf hin, dass die Parameter der ersten forminduzierten Unterschicht einzig eine Funktion der Rauheitsgeometrie sind und somit unabhängig von den Eigenschaften der Strömung. Im Fall rauer Sohlen, in denen die viskose Grenzschicht praktisch nicht vorhanden ist, könnten diese Ergebnisse es ermöglichen, die Grenzschicht als Lieferanten der für numerische Programme erforderlichen Randbedingungen durch die erste forminduzierte Unterschicht zu ersetzen.

Zuvor sind jedoch weiterführende Untersuchungen schematisierter sowie naturnaher Rauheitsstrukturen erforderlich. Im besonderen ist der Einfluss der Durchlässigkeit des Sohlenkörpers auf das Geschwindigkeitsprofil der Rauheitsschicht zu untersuchen. Die teilweise recht große Streubreite in den Ergebnissen verdeutlicht die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen, in denen das Strömungsfeld nicht nur zeitlich, sondern auch räumlich hoch aufgelöst zu erfassen ist. Mit der in Kap. 3.1.4 vorgestellten doppelten Mittelung der Navier-Stokes-Gleichungen ist dann eine Methode verfügbar, die eine Trennung in turbulente und rauheitsinduzierte Schwankungen ermöglicht. Vor allem in der Auswertung der statistischen Parameter liegt ein großes Potential zur Beschreibung der hydraulischen Wirkung sehr unregelmäßiger Sohlen. Dabei ist das Anwendungsgebiet natürlich nicht auf Sohlenrauheiten beschränkt, sondern ebenso für die Untersuchung z.B. von Vegetationseinflüssen geeignet.

Literaturverzeichnis

- Aberle, J. (2000): Untersuchung der Rauheitsstruktur zur Bestimmung des Fließwiderstandes in Gebirgsbächen unter Klarwasserabfluß. Mitt. des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe (TH), Heft 207 (Diss.)
- Andrews, E.D.; Smith, J.D. (1992): A theoretical model for calculating marginal bedload transport rates of gravel. Dynamics of Gravel-Bed Rivers, Eds. P. Billi, R.D. Hey, C.R. Thorne, P. Tacconi, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, U.K., 41-48
- Antonia, R.A.; Krogstad, P.-Å. (2001): Turbulence structure in boundary layers over different types of surface roughness. Fluid Dyn. Res., Vol. 28, 139-157
- Ashida, K.; Bayazit, M. (1973): Initiation of motion and roughness of flows in steep channels. Proc. 15th IAHR Congress, Istanbul, Turkey, Vol. 1, 475-484
- Bakke, P.D.; Basdekas, P.O.; Dawdy, D.R.; Klingeman, P.C. (1999): Calibrated Parker-Klingeman model for gravel transport. J. Hydr. Eng., Vol. 125, No. 6, 657-660
- Bathurst, J.C. (1985): Flow resistance estimation in mountain rivers. J. Hydr. Eng., Vol. 111, No. 4, 625-643
- Bathurst, J.C.; Graf, W.H.; Cao, H.H. (1987): Bed load discharge equations for steep mountain rivers. Sediment Transport in Gravel Bed Rivers, Eds. C.R. Thorne, J.C. Bathurst, R.D. Hey, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, U.K., 453-491
- Bayazit, M. (1976): Free surface flow in a channel of large relative roughness. J. Hydr. Res., Vol. 14, No. 2, 115-126
- Bayazit, M. (1982): Flow structure and sediment transport mechanics in steep channels. Euromech 156: Mechanics of Sediment Transport, Istanbul, 197-206
- Best, J.L. (1993): On the interactions between turbulent flow structure, sediment transport and bedform development: Some considerations from recent experimental research. Turbulence: Perspectives on flow and sediment transport. Eds. N.J. Clifford, J.R. French, J. Hardisty, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, U.K., 65-92
- Buffington, J.M.; Montgomery, D.R. (1997): A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bedded rivers. Wat. Res. Res., Vol. 33, No. 8, 1993-2029
- Buffington, J.M.; Montgomery, D.R. (1999): Effects of sediment supply on surface textures of gravel-bed rivers. Wat. Res. Res., Vol. 35, No. 11, 3523-3530
- Carling, P.A.; Kelsey, A.; Glaister, M.S. (1992): Effect of bed roughness, particle shape and orientation on initial motion criteria. Dynamics of Gravel-Bed Rivers, Eds. P. Billi, R.D. Hey, C.R. Thorne, P. Tacconi, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, U.K., 23-38
- Cellino, M.; Graf, W.H. (1999): Sediment-laden flow in open-channels under noncapacity and capacity conditions. J. Hydr. Eng., Vol. 125, No. 5, 455-462
- Chen, C.K.; Roberson, J.A. (1974): Turbulence in wakes of roughness elements. J. Hydr. Div., Vol. 100, No. HY1, 53-67
- Chin, C.O. (1985): Stream bed armouring. School of Engineering, Report No. 403, University of Auckland, New Zealand
- Clauser, F.H. (1956): The turbulent boundary layer. Adv. App. Mech., Vol. 4, 1-51
- Coleman, N.L. (1981): Velocity profiles with suspended sediment. J. Hydr. Res., Vol. 19, No. 3, 211-229
- Coleman, N.L. (1986): Effects of suspended sediment on the open-channel velocity distribution. Wat. Res. Res. Vol. 22, No. 10, 1377-1384

- Coles, D. (1956): The law of the wake in the turbulent boundary layer. *J. Fluid. Mech.*, Vol. 1, 191-226
- Dietrich, W.E.; Kirchner, J.W.; Ikeda, H.; Iseya, F. (1989): Sediment supply and the development of the coarse surface layer in gravel-bedded rivers. *Nature*, Vol. 340, 215-217
- Dittrich, A. (1998): Wechselwirkung Morphologie/Strömung naturnaher Fließgewässer. Mitt. des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe (TH), Heft 198 (Habil.)
- Dittrich, A. (2001): Stability of gravel bed rivers based on sieve analysis data. *J. Sed. Res.*, Vol. 16, No. 2, 194-200
- Dittrich, A.; Hammann de Salazar, K. (1993): Bed instability caused by clear water flow. Final Report of the Project Eroslope (EV5V-CT92-0179)
- Dittrich, A.; Koll, K. (1997): Velocity field and resistance of flow over rough surfaces with large and small relative submergence. *Int. J. Sed. Res.*, Vol. 12, No. 3, 21-33
- Dittrich, A.; Nestmann, F.; Ergenzinger, P. (1996): Ratio of lift and shear forces over rough surfaces. *Coherent Flow Structures in Open Channels*. Eds. P.J. Ashworth, S. Bennett, J.L. Best, S.J. McLelland, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, U.K., 125-146
- Dittrich, A.; Rosport, M.; Badde, O. (1992): Untersuchungen zum Stabilitätsverhalten von Gerinnesohlen. Mitt. des Instituts für Wasserbau und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe (TH), Heft 182
- Djenidi, L.; Elavarasan, R.; Antonia, R.A. (1999): The turbulent boundary layer over transverse square cavities. *J. Fluid Mech.*, Vol. 395, 271-294
- Durst, F.; Jovanovic, J.; Kanevce, Lj. (1987): Probability density distribution in turbulent wall boundary-layer flows. *Turbulent Shear Flows 5*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 197-220
- Egashira, S.; Ashida, K. (1991): Flow resistance and sediment transportation in streams with step-pool bed morphology. *Lecture Notes in Earth Sciences „Fluvial Hydraulics of Mountain Regions“*, Vol. 37, Eds. A. Armanini, G. Di Silvio, Springer Verlag, 45-58
- Egiazaroff, I.V. (1965): Calculation of nonuniform sediment concentrations. *J. Hydr. Div.*, Vol. 91, No. HY4, 225-247
- Fehr, R. (1987): Geschiebeanalysen in Gebrigsflüssen. Mitt. der VAW, ETH Zürich, Heft 92
- Fenton, J.D.; Abbott, J.E. (1977): Initial movement of grains on a stream bed: the effect of relative protrusion. *Proc. R. Soc. Lond. A.*, 523-537
- Gessler, J. (1965): Der Geschiebetriebbeginn bei Mischungen untersucht an natürlichen Abpflästerungserscheinungen in Kanälen. Diss. Nr. 3711, ETH-Zürich
- Gimenez-Curto, L.A.; Corniero Lera, M.A. (1996): Oscillating turbulent flow over very rough surfaces. *J. Geophys. Res.*, Vol. 101, No. C109, 20745-20758
- Goring, D.G.; Nikora, V.I. (1999): Phase-randomisation and phase-synchronisation as turbulence analysis tools. Proc. 28. IAHR Congress, Graz, Austria, D2
- Grass, A.J. (1970): Initial instability of fine bed sand. *J. Hydr. Div.*, Vol. 96, No. HY3, 619-632
- Grass, A.J. (1971): Structural features of turbulent flow over smooth and rough boundaries. *J. Fluid Mech.*, Vol. 50, Part 2, 233-255
- Grass, A.J.; Stuart, R.J.; Mansour-Tehrani, M. (1991): Vortical structures and coherent motion in turbulent flow over smooth and rough boundaries. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 336, 35-65
- Griffiths, G.A. (1981): Flow resistance in coarse gravel bed rivers. *J. Hydr. Div.*, Vol. 107, No. HY 7, 899-918

- Griffiths, G.A. (1989): Form resistance in gravel channels with mobile beds. *J. Hydr. Eng.*, Vol. 115, No. 3, 340-355
- Günter, A. (1971): Die kritische mittlere Sohlenschubspannung bei Geschiebemischungen unter Berücksichtigung der Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlenschubspannungsschwankungen. Diss. Nr. 4649, ETH Zürich
- Gupta, A.D.; Paudyal, G.N. (1985): Characteristics of free surface flow over gravel bed. *J. Irr. Drain. Eng.*, Vol. 111, No. 4, 299-318
- Gust, G.; Southard, J.B. (1983): Effects of weak bed load on the universal law of the wall. *J. Geophys. Res.*, Vol. 88, No. C10, 5939-5952
- Habersack, H.M. (2000): Stochastic and deterministic sediment transport model concepts. Proc. 8th Int. Symp. on Stochastic Hydraulics, Eds. Wang & Hu, Balkema, Rotterdam, 235-245
- Hager, W.H. (1998): Boussinesq (1842-1929) - ein mathematischer Hydrauliker. *Wasser Abwasser gwf*, Vol. 139, Nr. 1, 38-45
- Handler, R.A.; Levich, E.; Sirovich, L. (1993): Drag reduction in turbulent channel flow by phase randomization. *Phys. Fluids A*, Vol. 5, No. 3, 686-694
- Hartung, F.; Scheuerlein, H. (1970): Design of overflow rockfill dams. *Dixième Congrès des Grands Barrages*, Montréal
- Hassan, M.A.; Church, M. (2000): Experiments on surface structure and partial sediment transport on a gravel bed. *Wat. Res. Res.*, Vol. 36, No. 7, 1885-1895
- Hayward, J.A. (1980): Hydrology and stream sediments. Ph.D.-Thesis, University of Canterbury, Tussok Grasslands and Mountain Lands Institute, New Zealand, special Publ. No. 17
- Hegg, C.; Rickenmann, D. (1999): Comparison of bedload transport in a steep mountain torrent with a bedload transport formula. Proc. 28. IAHR Congress, Graz, Austria, E8
- Hunziker, R.P. (1995): Fraktionsweiser Geschiebetransport. *Mitt. der VAW*, ETH Zürich, Heft 138
- Jackson, W.L.; Beschta, R.L. (1984): Influences of increased sand delivery on the morphology of sand and gravel channels. *Wat. Res. Bull.*, Vol. 20, No. 4, 527-533
- Jain, S.C. (1990): Armor or pavement. *J. Hydr. Eng.*, Vol. 116, No. 3, 436-440
- de Jong, C. (1995): Temporal and spatial interactions between river bed roughness, geometry, bedload transport and flow hydraulics in mountain streams - examples from Squaw Creek (Montana, USA) and Lainbach/Schmiedlaine (Upper Bavaria, Germany). *Berliner Geographische Abhandlungen*, Heft 59
- Jüpner, R. (1993): Die Erosion grober Sohlpartikel: Untersuchung der Auftriebs- und Schubkräfte. Dissertation im Fachbereich Geowissenschaften, FU Berlin
- von Kármán, Th. (1930): Mechanische Ähnlichkeit und Turbulenz. *Nachr. Ges. Wiss., Math.-Phys. Kl.*, 58-76
- Kirkbride, A. (1993): Observations of the influence of bed roughness on turbulence structure in depth limited flows over gravel beds. *Turbulence: Perspectives on flow and sediment transport*. Eds. N.J. Clifford, J.R. French, J. Hardisty, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, U.K., 185-196
- Kirkgöz, M.S. (1989): Turbulent velocity profiles for smooth and rough open channel flow. *J. Hydr. Eng.*, Vol. 115, No. 11, 1543-1561
- Kline, S.J.; Reynolds, W.C.; Schraub, F.A.; Runstadler, P.W. (1967): The structure of turbulent boundary layers. *J. Fluid Mech.*, Vol. 30, No. 4, 741-773

- Koll, K.; Dittrich, A. (1998): Sediment transport and erosion in mountain streams. Proc. Int. Symp. on Modelling Soil Erosion, Sediment Transport and Closely Related Hydrological Processes, Vienna, Austria, IAHS Publ. No. 249, Eds. W. Summer, E. Klaghofer, W. Zhang, 309-316
- Koll, K.; Dittrich, A. (1999): Validation of incipient motion formulas with field data. Proc. 7th Int. Symp. on River Sedimentation, Hong Kong, China, Eds. A.W. Jayawardena, J.H.W. Lee, Z.Y. Wang, 247-252
- Krogstad, P.-Å.; Antonia, R.A.; Browne, L.W.B. (1992): Comparison between rough- and smooth-wall turbulent boundary layers. J. Fluid Mech., Vol. 245, 599-617
- Koenders, M.A.; Reymann, S.; Köhler, H.J. (2000): Theoretical and experimental analysis of flow in a turbulent filter layer. Filters and Drainage in Geotechnical and Environmental Engineering, Eds. W. Wolski, J. Mlynarek, Balkema, Rotterdam, 67-74
- Kozłowski, B. (2000): Ringstrukturen - Eine neue Clusterart in alpinen Wildbächen. Dissertation im Fachbereich Geowissenschaften, FU Berlin
- Kuhnle, R.A. (1993): Incipient motion of sand-gravel sediment mixtures. J. Hydr. Eng., Vol. 119, No. 12, 1400-1415
- Kuhnle, R.A.; Willis, J.C. (1992): Mean size distribution of bed load on Goodwin Creek. J. Hydr. Eng., Vol. 118, No. 10, 1443-1446
- Lisle, T.E. (1995): Particle size variations between bed load and bed material in natural gravel bed channels. Wat. Res. Res., Vol. 31, No. 4, 1107-1118
- Lisle, T.E.; Nelson, J.M.; Pitlick, J.; Madej, MA; Barkett, B.L. (2000): Variability of bed mobility in natural, gravel-bed channels and adjustments to sediment load at local and reach scales. Wat. Res. Res., Vol. 36, No. 12, 3473-3755
- López, F.; García, M.H. (2001): Mean flow and turbulence structure of open-channel flow through non-emergent vegetation. J. Hydr. Eng., Vol. 127, No. 5, 392-402
- Lyn, D.A. (1992): Turbulence characteristics of sediment-laden flows in open channels. J. Hydr. Eng., Vol. 118, No. 7, 971-988
- Marion, A.; Fraccarollo, L. (1997): Experimental investigation of mobile armoring development. Wat. Res. Res., Vol. 33, No. 6, 1447-1453
- McEwan, I.; Heald, J. (2001): Discrete particle modeling of entrainment from flat uniformly sized sediment beds. J. Hydr. Eng., Vol. 127, No. 7, 588-597
- Meyer-Peter, E.; Müller, R. (1948): Formeln für Geschiebetransport. 2. Tagung des Int. Verbands für wasserbauliches Versuchswesen, Stockholm
- Meyer-Peter, E.; Müller, R. (1949): Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebs. Schweiz. Bauzeitung, Jhg. 67, Heft 3, 29-32
- Morris, H.M. (1955): Flow in rough conduits. ASCE Transactions, Vol. 120, Paper No. 2745, 373-410
- Nakagawa, H.; Tsujimoto, T.; Shimizu, Y. (1988): Velocity profile of flow over rough permeable bed. 6th IAHR Congress, Kyoto, Japan, 449-456
- Nakagawa, H.; Tsujimoto, T.; Shimizu, Y. (1991): Turbulent flow with small relative submergence. Lecture Notes in Earth Sciences „Fluvial Hydraulics of Mountain Regions“, Vol. 37, Eds. A. Armanini & G. Di Silvio, Springer Verlag, 33-44
- Nelson, J.M.; Schmeeckle, M.W.; Shreve, R.L. (2001): Turbulence and particle entrainment. Gravel Bed Rivers V, Ed. M.P. Mosley, 221-248
- Nestmann, F. (1992): Improvement of the Upper Rhine, tail water (TW) Iffezheim. Proc. 5th Int. Symp. on River Sedimentation, Karlsruhe, Germany, 1130-1152

- Nezu, I.; Nakagawa, H. (1993a): Turbulence in open-channel flows. IAHR Monograph, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, ISBN 90 5410 118 0
- Nezu, I.; Nakagawa, H. (1993b): Three-dimensional structures of coherent vortices generated behind dunes in turbulent free-surface flows. Proc. 5th Int. Symp. of Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements, Paris, 603-612
- Nezu, I.; Rodi, W. (1986): Open-channel flow measurements with a laser doppler anemometer. J. Hydr. Eng., Vol. 112, No. 5, 335-355
- Nikora, V.I.; Goring, D.G. (1999): Are weakly mobile-bed flows a special class of wall-bounded flows? Proc. 28. IAHR Congress, Graz, Austria, D7
- Nikora, V.I.; Goring, D.G. (2000): Flow turbulence over fixed and weakly mobile gravel beds. J. Hydr. Eng., Vol. 126, No. 9, 679-690
- Nikora, V.I.; Goring, D.G. (2002): Fluctuations of suspended sediment concentration and turbulent sediment fluxes in an open-channel flow. J. Hydr. Eng., Vol. 128, No. 2, 214-224
- Nikora, V.I.; McLean, S.R. (2001): Environmental flows over rough beds: A spatial averaging approach. Proc. 3rd Int. Symp. Environmental Hydraulics (ISEH), 1-6
- Nikora, V.I.; Smart, G.M. (1997): Turbulence characteristics of New Zealand gravel-bed rivers. J. Hydr. Eng., Vol. 123, No. 9, 764-773
- Nikora, V.I.; Goring, D.G.; McEwan, I.; Griffiths, G. (2001): Spatially-averaged open-channel flow over a rough bed. J. Hydr. Eng., Vol. 127, No. 2, 123-133
- Nikora, V.I., Goring, D.G.; Biggs, B.J.F. (2002a): Some observations of the effects of micro-organisms growing on the bed of an open channel on the turbulence properties. J. Fluid Mech., Vol. 450, 317-341
- Nikora, V.I.; Koll, K.; McLean, S.; Dittrich, A.; Aberle, J. (2002b): Zero-plane displacement for rough-bed open-channel flows. Accepted Paper to the Conference "RiverFlow 2002", Belgium, Sept. 2002
- Nikuradse, J. (1933a): Gesetzmäßigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Rohren. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, Band 77, Nr. 2, 48
- Nikuradse, J. (1933b): Strömungsgesetze in rauhen Rohren. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, Band 77, Nr. 39, 1075-1076
- Nowell, A.R.M.; Church, M. (1979): Turbulent flow in a depth-limited boundary layer. J. Geophysical Res., Vol. 84, No. C8, 4816-4824
- O'Loughlin, E.M.; Annambhotla, V.S.S. (1969): Flow phenomena near rough boundaries. J. Hydr. Res., Vol. 7, No. 2, 231-250
- O'Loughlin, E.M.; Macdonald, E.G. (1964): Some roughness-concentration effects on boundary resistance. La Houille Blanche, No. 7, 773-783
- Paintal, A.S. (1971): A stochastic model of bed load transport. J. Hydr. Res., Vol. 9, No. 4, 527-554
- Palt, S.M. (2001): Sedimenttransporte im Himalaya-Karakorum und ihre Bedeutung für Wasserkraftanlagen. Mitt. des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe (TH), Heft 209 (Diss.)
- Papanicolaou, A.N.; Diplas, P.; Evaggelopoulos, N.; Fotopoulos, S. (2002): Stochastic incipient motion criterion for spheres under various bed packing conditions. J. Hydr. Eng., Vol. 128, No. 4, 369-380
- Parker, G. (1990): Surface-based bedload transport relation for gravel rivers. J. Hydr. Res., Vol. 28, No. 4, 417-436

- Parker, G.; Klingeman, P.C. (1982): On why gravel bed streams are paved. *Wat. Res. Res.*, Vol. 18, No.5, 1409-1423
- Parker, G.; Dhamotharan, S.; Stefan, H. (1982a): Model experiments on mobile, paved gravel bed streams. *Wat. Res. Res.*, Vol. 18, No. 5, 1395-1408
- Parker, G.; Klingeman, P.C.; McLean, D.G. (1982b): Bedload and size distribution in paved gravel-bed streams. *J. Hydr. Div.*, Vol. 108, No. HY4, 544-571
- Patnaik, P.C.; Vittal, N.; Pande, P.K. (1994): Lift coefficient of a stationary sphere in gradient flow. *J. Hydr. Res.*, Vol. 32, No. 3, 471-480
- Pender, G.; Shvidchenko, A. (1999): The observation of bedload sheets in laboratory experiments. *Proc. 28. IAHR Congress, Graz, Austria*, E5
- Pender, G.; Willetts, B.B.; Fuller, C. (1997): A comparison of bedload composition in degradation experiments with man-made and water worked beds. *Proc. 3rd Int. Conf. on River Flood Hydraulics, Stellenbosch, Southafrica*, HR Wallingford Limited, Paper 28, 275-284
- Perry, A.E.; Abell, C.J. (1977): Asymptotic similarity of turbulence structures in smooth- and rough-walled pipes. *J. Fluid Mech.*, Vol. 79, 785-799
- Pitlick, J. (1992): Flow resistance under conditions of intense gravel transport. *Wat. Res. Res.*, Vol. 28, No. 3, 891-903
- Prandtl, L. (1933): Neuere Ergebnisse der Turbulenzforschung. *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, Band 77, Nr. 5, 105-113
- Rauch, H.P.; Schreiber, J.; Koll, K. (2001): Methods for quantifying the bed roughness at the River Wienfluss. *Contribution for the EGS 26. General Assembly, Nice, France*
- Raupach, M.R.; Shaw, R.H. (1982): Averaging procedures for flow within vegetation canopies. *Boundary Layer Meteorology*, 22, 79-90
- Raupach, M.R.; Antonia, R.A.; Rajagopalan, S. (1991): Rough-wall turbulent boundary layers. *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 44, No. 1, 1-25
- Rickenmann, D. (1990): Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. *Mitt. der VAW, ETH Zürich*, Heft 103
- Rickenmann, D. (2001): Comparison of bed load transport in torrents and gravel bed streams. *Wat. Res. Res.*, Vol. 37, No. 12, 3295-3305
- Rosport, M. (1998): Fließwiderstand und Sohlstabilität steiler Fließgewässer unter Berücksichtigung gebirgsbachtypischer Sohlstrukturen. *Mitt. des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe (TH)*, Heft 196 (Diss.)
- Rotta, J. (1950): Das in Wandnähe gültige Geschwindigkeitsgesetz turbulenter Strömungen. *Ing.-Arch.*, Band 18, 277-280
- Scheuerlein, H. (1968): Der Rauherinneabfluss: Ein Beitrag zur Erfassung der Fließbewegung in steilen offenen Gerinnen mit großer natürlicher Rauigkeit. *Mitt. der Versuchsanstalt für Wasserbau, TH München/Obernach*, Heft 14
- Scheuerlein, H. (1999): Morphological dynamics of step-pool systems in mountain streams and their importance for riparian ecosystems. *Proc. 7th Int. Symp. on River Sedimentation, Hong Kong, China*, Eds. A.W. Jayawardena, J.H.W. Lee, Z.Y. Wang, 205-210
- Schlichting, H. (1936): Experimentelle Untersuchungen zum Rauigkeitsproblem. *Ing. Arch.* 7, 1-34
- Schlichting, H. (1982): *Grenzschichttheorie*. 8. Auflage, G. Braun, Karlsruhe
- Schlichting, H.; Gersten, K. (1997): *Grenzschichttheorie*. 9. völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer

- Schöberl, F. (1979): Zur Frage der Gefällsausbildung beim Selbststabilisierungsprozess von erodierenden Flußstrecken. Diss. Institut für Konstruktiven Wasser- und Tunnelbau, Universität Innsbruck
- Schöberl, F. (1981): Abpflasterungs- und Selbststabilisierungsvermögen erodierter Gerinne. Österreichische Wasserwirtschaft, Jg. 33, Heft 7/8, S. 180-186
- Schöberl, F. (1992a): Prediction methods for grain size distribution and armour layer stability. Proc. Int. Grain Sorting Seminar, Ascona, Switzerland, Oct 1991; Mitt. der VAW, ETH Zürich, Heft 117, 251-271
- Schöberl, F. (1992b): Upper limits and transition stages of developing armour coats. Proc. 5th Int. Symp. on River Sedimentation, Karlsruhe, Germany, 671-676
- Schoklitsch, A. (1962): Handbuch des Wasserbaus. Springer Verlag, Wien
- Schreiber, J. (2001): Untersuchung der Sohlschubspannung im Uferbewuchs. Diplomarbeit am Arbeitsbereich Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur, Wien
- Shields, A. (1936): Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Mitt. der Preußischen Versuchsanstalt für Wasser- und Schiffbau, Berlin, Heft 26
- Shimizu, Y.; Tsujimoto, T.; Nakagawa, H. (1990): Experiment and macroscopic modelling of flow in highly permeable porous medium under free-surface flow. J. Hydro. Hydr. Eng., Vol. 8, No. 1, 69-78
- Shvidchenko, A.B.; Pender, G. (2000): Flume study of the effect of relative depth on the incipient motion of coarse uniform sediments. Wat. Res. Res., Vol. 36, No. 2, 619-628
- Shvidchenko, A.B.; Pender, G. (2001): Macroturbulent structure of open-channel flow over gravel beds. Wat. Res. Res., Vol. 37, No. 3, 709-719
- Shvidchenko, A.B.; Pender, G.; Hoey, T.B. (2001): Critical shear stress for incipient motion of sand/gravel streambeds. Wat. Res. Res., Vol. 37, No. 8, 2273-2283
- Sibanda, E.; McEwan, I.; Marion, A. (2000): Measuring the structure of mixed-grain-size sediment beds. J. Hydr. Eng., Vol. 126, No. 5, 347-353
- Sirovich, L.; Karlsson, S. (1997): Turbulent drag reduction by passive mechanisms. Nature, Vol. 388, 753-755
- Smart, G.M. (1999): Turbulent velocity profiles and boundary shear in gravel bed rivers. J. Hydr. Eng., Vol. 125, No. 2, 106-116
- Smart, G.M.; Jäggi, M.N.R. (1983): Sedimenttransport in steilen Gerinnen. Mitt. der VAW, ETH Zürich, Heft 64
- Smith, J.D.; McLean, S.R. (1977): Spatially averaged flow over wavy surface. J. Geophys. Res., Vol. 82, No. 12, 1735-1476
- Song, T.; Chiew, Y.M.; Chin, C.O. (1998): Effect of bed-load movement on flow friction factor. J. Hydr. Eng., Vol. 124, No. 2, 165-175
- Sun, Z.; Donahue, J. (2000): Statistically derived bedload formula for any fraction of nonuniform sediment. J. Hydr. Eng., Vol. 126, No. 2, 105-111
- Suszka, L. (1991): Modification of transport rate formula for steep channels. Lecture Notes in Earth Sciences „Fluvial Hydraulics of Mountain Regions“, Vol. 37, Eds. A. Armanini & G. Di Silvio, Springer Verlag, 59-70
- Tait, S.J.; Willetts, B.B. (1992): Characterisation of armoured bed surfaces. Proc. Int. Grain Sorting Seminar, Ascona, Switzerland, Oct 1991; Mitt. der VAW, ETH Zürich, Heft 117, 207-225

- Tait, S.J.; McEwan, I.K.; Marion, A. (1997): Bed re-arrangement under conditions of variable upstream sediment supply. Proc. 3rd Int. Conf. on River Flood Hydraulics, Stellenbosch, Southafrica, HR Wallingford Limited, Paper 20, 197-206
- Tominaga, A.; Nezu, I. (1992): Velocity profiles in steep open-channel flows. J. Hydr. Eng., Vol. 118, No. 1, 73-90
- Tsujimoto, T. (1991): Bed-load transport in steep channels. Lecture Notes in Earth Sciences „Fluvial Hydraulics of Mountain Regions“, Vol. 37, Eds. A. Armanini & G. Di Silvio, Springer Verlag, 89-102
- Umeyama, M.; Gerritsen, F. (1992): Velocity distribution in uniform sediment-laden flow. J. Hydr. Eng., Vol. 118, No. 2, 229-245
- Vanoni, V.A.; Nomicos, G.N. (1959): Resistance properties of sediment-laden streams. J. Hydr. Div., Vol. 85, No. HY5, 77-107
- Vollmer, S.; de los Santos Ramos, F.; Daebel, H.; Kühn, G. (2002): Microscale exchange processes between surface and subsurface water. J. Hydrol., accepted paper
- Wang, J.; Dong, Z.; Chen, C.; Xia, Z. (1993): The effects of bed roughness on the distribution of turbulent intensities in open-channel flow. J. Hydr. Res., Vol. 31, No. 1, 89-98
- Wang, X.; Wang, Z.Y.; Yu, M.; Li, D. (2001): Velocity profile of sediment suspensions and comparison of log-law and wake-law. J. Hydr. Res.; Vol. 39, No. 2, 211-217
- Wang, Z.Y. (1999): Experimental study on scour rate and river bed inertia. J. Hydr. Res. Vol. 37, No. 1, 17-37
- Wang, Z.Y.; Larsen, P. (1994): Turbulent structure of water and clay suspensions with bed load. J. Hydr. Eng., Vol. 120, No. 5, 577-600
- Wang, Z.Y.; Larsen, P.; Nestmann, F.; Dittrich, A. (1998): Resistance and drag reduction of flows of clay suspensions. J. Hydr. Eng., Vol. 124, No. 1, 41-49
- Whittaker, J.G. (1982): Flow and sediment movement in stepped channels. Ph.D.-Thesis, University of Canterbury, Lincoln College New Zealand
- Wijetunge, J.J.; Sleath, J.F.A. (1998): Effects of sediment transport on bed friction and turbulence. J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng., Vol. 124, No. 4, 172-178
- Wilcock, P.R. (1993): Critical shear stress of natural sediments. J. Hydr. Eng., Vol. 119, No. 4, 491-505
- Wilcock, P.R. (1997): The components of fractional transport rate. Wat. Res. Res., Vol. 33, No. 1, 247-258
- Wilcock, P.R. (2001): The flow, the bed, and the transport: Interaction in flume and field. Gravel-Bed Rivers V, Ed. M.P. Mosley, 183-208
- Wilcock, P.R.; McArdell, B.W. (1993): Surface-based fractional transport rates: Mobilization thresholds and partial transport of a sand-gravel sediment. Wat. Res. Res., Vol. 29, No. 4, 1297-1312
- Wilcock, P.R.; Southard, J.B. (1988): Experimental study on incipient motion in mixed-size sediment. Wat. Res. Res., Vol. 24, No. 7, 1137-1151
- Wilcock, P.R.; Barta, A.F.; Shea, C.C.; Kondolf, G.M.; Matthews, W.V.G.; Pitlick, J. (1996a): Observations of flow and sediment entrainment on a large gravel-bed river. Wat. Res. Res., Vol. 32, No. 9, 2897-2909
- Wilcock, P.R.; Kenworthy, S.T.; Crowe, J.C. (2001): Experimental study of the transport of mixed sand and gravel. Wat. Res. Res., Vol. 37, No. 12, 3349-3358

-
- Wilcock, P.R.; Kondolf, G.M.; Matthews, W.V.G.; Barta, A.F. (1996b): Specification of sediment maintenance flows for a large gravel-bed river. *Wat. Res. Res.*, Vol. 32, No. 9, 2911-2921
- Willetts, B.B.; McEwan, I.K.; Pender, G. (1997): The response of graded sediment beds to high stage flow. *Proc. 3rd Int. Conf. on River Flood Hydraulics*, Stellenbosch, Southafrica, HR Wallingford Limited, Paper 8, 75-80
- Wilson, N.R.; Shaw, R.H. (1977): A higher closure model for canopy flow. *J. Applied Meteorology*, Vol. 16, 1197-1205
- Wu, W.; Wang, S.S.Y. (1999): Movable bed roughness in alluvial rivers. *J. Hydr. Eng.*, Vol. 125, No. 12, 1309-1312
- Wu, W.; Wang, S.S.Y.; Jia, Y. (2000): Nonuniform sediment transport in alluvial rivers. *J. Hydr. Res.*, Vol. 38, No. 6, 427-434
- Zimmermann, A.; Church, M. (2001): Channel morphology, gradient profiles and bed stress during flood in a step-pool channel. *Geomorphology*, Vol. 40, 311-327

Anhang

Anhang A Datengrundlage zu Kap. 2	A-1
A.1 Parameter der Zugabeversuche	A-1
A.2 Parameter der statischen Deckschichten	A-2
A.3 Transportierte Menge und mittlere Fließgeschwindigkeit.....	A-3
A.4 Sieblinien des erodierten Sohlenmaterials.....	A-11
A.5 Darstellung der Transportraten, der Geschiebezusammensetzung, des mittleren Korndurchmessers und der mittleren Fließgeschwindigkeit.....	A-25
A.6 Darstellung der Kornbänder des erodierten Sohlenmaterials.....	A-37
A.7 Darstellung der Sieblinien des erodierten Sohlenmaterials.....	A-43
Anhang B Datengrundlage zu Kapitel 3	B-1
B.1 Vertikale Geschwindigkeitsprofile	B-1
B.2 Darstellung der doppelt gemittelten Geschwindigkeitsprofile	B-23
B.3 Darstellung der Profile der Rauheitsintensität.....	B-26

A Datengrundlage zu Kap. 2

A.1 Parameter der Zugabeversuche

d_{zu} = Zugabefraktion g_{zu} = Zugaberate T = Zugabedauer Z = Zugabemenge
 Q_c = kritischer Durchfluss der statischen Deckschicht im Zustand maximaler Bettstabilität
 Q_{zu} = Durchfluss während der Zugabe
 Q_1 = zur Herstellung der statischen Deckschicht vor der Zugabe eingestellter Durchfluss
 Q_2 = am Ende der Zugabe eingestellter Durchfluss

Versuch	d_{zu} [mm]	g_{zu} [kg/m·min]	T [min]	Z [kg]	Q_1 [l/s]	Q_{zu} [l/s]	Q_2 [l/s]
V1	5 - 8	1,25	120	30	3,10	3,10	3,10
V2	5 - 8	2,5	60	30	3,20	3,20	3,20
V3.1	5 - 8	5	60	60	3,20	3,20	3,20
V3.2	5 - 8	5	60	60	3,20	3,20	3,20
V3.3	5 - 8	5	60	60	3,20	3,20	3,20
V3.4	5 - 8	5	60	60	3,13	3,13	3,13
V3.5	5 - 8	5	60	60	3,15	3,15	3,15
V4	5 - 8	5	120	120	3,20	3,20	3,20
V5	5 - 8	5	480	480	3,11	3,11	3,11
V6	5 - 8	10	60	120	3,20	3,20	3,20
V7	5 - 8	40	60	480	3,12	3,12	3,12
V8	0 - 1	5	60	60	3,20	3,20	3,20
V9	8 - 16	1,25	120	30	3,14	3,14	3,14
V10	8 - 16	5	60	60	3,15	3,15	3,15
V11	8 - 16	10	60	120	3,18	3,18	3,18
V12	16 - 32	5	60	60	3,10	3,10	3,10
V13 ¹⁾	5 - 32	5	60	60	3,15	3,15	3,15
V14 ²⁾	5 - 32	5	60	60	3,10	3,10	3,10
V15	5 - 8	5	60	60	2,42	3,16	2,38
V16	5 - 8	5	60	60	2,41	3,20	3,03
V17	5 - 8	5	60	60	3,19	3,70	3,13
V18	8 - 16	5	60	60	3,04	3,68	3,01

¹⁾ 5 - 8 mm: 10 %; 8 - 16 mm: 60 %; 16 - 32 mm: 30 %

²⁾ 5 - 8 mm: 33,3 %; 8 - 16 mm: 33,3 %; 16 - 32 mm: 33,3 %

A.2 Parameter der statischen Deckschichten

Q_1 = zur Herstellung der statischen Deckschicht vor der Zugabe eingestellter Durchfluss

u_m = mittlere Fließgeschwindigkeit bei $Q = Q_1$

l_s = Sohlenneigung

s = Standardabweichung der Sohlenerhebungen

d_{mD} = mittlerer Korndurchmesser der Deckschicht

Q_2 = am Ende der Zugabe eingestellter Durchfluss

Versuch	vor der Zugabe					nach der Zugabe				
	Q_1 [l/s]	u_m [m/s]	l_s [%]	s [cm]	d_{mD} [mm]	Q_2 [l/s]	u_m [m/s]	l_s [%]	s [cm]	d_{mD} [mm]
V0.1	2,41	0,476	8,81	1,03	27,79					
V0.2	3,15	0,521	8,82	1,08	28,20					
V1	3,10	0,531	8,54	0,93	22,99	3,10	0,460	8,07	1,05	25,95
V2	3,20	0,496	9,59	1,06	27,71	3,20	0,505	9,23	1,08	23,41
V3.1	3,20	0,539	9,09	1,13	28,41	3,20	0,462	9,22	1,27	33,84
V3.2	3,20	0,502	9,29	1,11	26,41	3,20	0,442	8,65	1,36	34,44
V3.3	3,20	0,534	8,46	0,98	29,78	3,20	0,478	8,67	1,05	32,75
V3.4	3,13	0,535	9,31	1,19	28,70	3,13	0,502	9,05	1,24	30,45
V3.5	3,15	0,500	9,53	1,06	28,61	3,15	0,451	9,98	1,27	26,63
V4	3,20	0,476	8,76	1,27	27,38	3,20	0,463	8,53	1,08	26,13
V5	3,11	0,528	7,82	0,98	26,45	3,11	0,460	7,71	0,99	33,63
V6	3,20	0,504	8,24	1,14	29,19	3,20	0,550	7,96	1,02	29,24
V7	3,12	0,524	9,17	1,14	30,46	3,12	0,505	8,65	1,27	34,41
V8	3,20	0,547	8,13	1,07	31,71	3,20	0,547	7,87	1,05	30,67
V9	3,14	0,502	9,11	1,25	29,05	3,14	0,493	9,50	1,06	25,98
V10	3,15	0,505	8,71	1,08	26,05	3,15	0,535	9,15	0,80	17,01
V11	3,18	0,571	8,14	1,17	27,45	3,18	0,517	8,61	0,93	30,49
V12	3,10	0,478	8,85	0,96	26,36	3,10	0,596	8,27	0,88	27,50
V13	3,15	0,522	8,15	0,93	28,98	3,15	0,496	9,59	0,97	26,07
V14	3,10	0,532	8,11	1,04	30,08	3,10	0,531	7,51	1,05	22,39
V15	2,42	0,421	8,75	0,86	25,40	2,38	0,434	8,26	1,00	28,89
V16	2,41	0,498	8,49	1,11	30,19	3,03	0,456	8,76	1,03	33,01
V17	3,19	0,502	9,90	1,13	30,41	3,13	0,472	9,03	1,17	26,96
V18	3,04	0,584	9,43	1,08	27,14	3,01	0,589	8,23	1,24	29,58

A.3 Transportierte Menge und mittlere Fließgeschwindigkeit

TS = Menge des erodierten Sohlenmaterials

TZ = Menge des transportierten Zugabematerials

TG = Gesamtmenge des transportierten Materials

u_m = mittlere Fließgeschwindigkeit

V0	Zeit [min]	TS [g]	u_m [m/s]
V0.1	0	0	0,509
	5	6088	0,618
	10	10004	0,527
	15	3278	
	20	1342	0,540
	25	317	
	30	1070	0,567
	35	5418	
	40	1612	0,554
	45	807	
	60	1287	0,518
	90	2142	0,544
	120	1137	0,599
	150	964	0,555
	180	715	0,545
	210	139	0,508
	270	262	0,544
	330	1438	0,501
	390	2005	0,516
	450	1708	0,559
	510	1486	0,566
	570	715	0,530
	630	288	0,508
	690	147	0,522
V0.2	0	0	0,522
	5	5291	0,570
	10	2780	0,573
	15	2538	
	20	855	0,582
	25	299	
	30	140	0,577
	60	839	0,574
	90	785	0,611
	120	411	0,629

V1	Zeit [min]	TS [g]	TZ [g]	TG [g]	u_m [m/s]
	0	0	0	0	0,531
	5	129	4	133	
	10	704	20	724	0,529
	15	2584	88	2672	
	20	2362	167	2529	0,543
	25	1240	208	1448	
	30	1016	365	1381	0,538
	35	902	479	1381	
	40	913	574	1487	0,541
	45	1533	933	2466	
	50	382	460	842	0,541
	55	379	531	910	
	60	1763	1233	2996	0,536
	65	1679	1227	2906	
	70	1733	1038	2771	0,504
	75	2332	1107	3439	
	80	1109	804	1913	0,518
	85	418	534	952	
	90	1344	1209	2553	0,443
	95	748	1100	1848	
	100	551	540	1091	0,532
	105	1159	1024	2183	
	110	1172	1160	2332	0,479
	115	737	940	1677	
	120	702	842	1544	0,472
	125	185	320	505	
	130	110	213	323	0,467
	135	285	541	826	0,488
	150	1164	1189	2353	0,488
	165	338	422	760	
	180	179	140	319	0,441
	210	174	141	315	
	270	488	511	999	
	330	902	572	1474	
	390	352	204	556	
	450	593	301	894	
	510	210	121	331	0,460
	570	150	86	236	

V2				
Zeit	TS	TZ	TG	u_m
[min]	[g]	[g]	[g]	[m/s]
0	0	0	0	0,496
5	192	6	198	
10	382	67	449	
15	1171	438	1609	0,529
20	1865	1039	2904	
25	2876	1873	4749	
30	2564	1391	3955	0,516
35	3617	2111	5728	
40	2383	1537	3920	
45	1066	1779	2845	0,426
50	1340	1958	3298	
55	1652	2024	3676	
60	1045	2286	3331	0,430
65	537	1010	1547	
70	268	796	1064	
75	775	1284	2059	
90	1694	1384	3078	
120	631	375	1006	
150	309	137	446	
210	618	366	984	
270	183	71	254	
330	1521	538	2059	
390	328	89	417	
450	169	28	197	
510	67	9	76	0,505

V3.1				
Zeit	TS	TZ	TG	u_m
[min]	[g]	[g]	[g]	[m/s]
0	0	0	0	0,539
5	314	42	356	
10	1387	882	2269	
15	2863	2970	5833	0,570
20	3069	2526	5595	
25	2403	3386	5789	
30	2630	4844	7474	0,562
35	3392	5027	8419	
40	2714	3848	6562	
45	1656	3584	5240	0,537
50	1635	3884	5519	
55	1856	4590	6446	
60	2353	4298	6651	0,554
65	2241	3652	5893	
70	697	941	1638	
75	621	513	1134	
90	577	408	985	
120	795	575	1370	
150	1290	657	1947	
210	443	253	696	
270	292	110	402	
330	65	67	132	
390	217	93	310	
450	92	30	122	0,462

V3.2				
Zeit	TS	TZ	TG	u_m
[min]	[g]	[g]	[g]	[m/s]
0	0	0	0	0,502
5	212	26	238	
10	1791	1264	3055	
15	2987	3616	6603	0,542
20	2831	2915	5746	
25	3439	3899	7338	
30	4126	4900	9026	0,531
35	2385	3259	5644	
40	2727	5639	8366	
45	2055	3401	5456	0,561
50	1576	3729	5305	
55	2278	5190	7468	
60	997	3565	4562	0,548
65	1392	3452	4844	
70	1462	1980	3442	
75	1260	1230	2490	
90	1492	1317	2809	
120	602	497	1099	
150	753	446	1199	
210	357	229	586	
270	434	213	647	
330	342	147	489	
390	136	90	226	
450	118	64	182	0,442

V3.3				
Zeit	TS	TZ	TG	u_m
[min]	[g]	[g]	[g]	[m/s]
0	0	0	0	0,534
5	285	40	325	
10	1719	293	2012	0,558
15	6839	3195	10034	
20	4179	2810	6989	0,588
25	3224	3677	6901	
30	1902	3357	5259	0,556
35	2824	5267	8091	
40	2406	5034	7440	0,573
45	1460	3438	4898	
50	2013	3865	5878	0,520
55	1103	4340	5443	
60	1926	4361	6287	0,483
65	1760	3825	5585	
70	1779	2431	4210	
75	871	1235	2106	0,432
80	946	861	1807	
85	373	237	610	
90	288	169	457	0,483
95	738	569	1307	
105	1567	1065	2632	
120	1248	648	1896	
150	1211	567	1778	
210	1022	389	1411	
270	177	59	236	
330	93	33	126	0,478

V3.4				
Zeit	TS	TZ	TG	u_m
[min]	[g]	[g]	[g]	[m/s]
0	0	0	0	0,535
5	37	12	49	
10	503	902	1405	0,606
15	1594	3746	5340	
20	1770	4389	6159	0,569
25	2105	4277	6382	
30	1251	4724	5975	0,562
35	1036	3932	4968	
40	684	4432	5116	0,554
45	1152	4730	5882	
50	1158	4246	5404	0,528
55	1244	4783	6027	
60	1122	3368	4490	0,555
65	2284	5203	7487	
70	982	1017	1999	0,492
75	266	294	560	
80	237	258	495	0,489
85	336	367	703	
90	422	306	728	0,481
105	295	212	507	
120	264	183	447	
150	1111	525	1636	
210	777	331	1108	
270	907	457	1364	
330	581	183	764	
390	795	274	1069	
450	392	124	516	
510	151	40	191	0,502

V3.5				
Zeit	TS	TZ	TG	u_m
[min]	[g]	[g]	[g]	[m/s]
0	0	0	0	0,500
5	240	9	249	
10	709	479	1188	0,568
15	2686	2720	5406	
20	3102	3858	6960	0,549
25	2494	3972	6466	
30	1652	3892	5544	0,532
35	1394	3851	5245	
40	1730	2854	4584	0,477
45	1612	3398	5010	
50	2827	4362	7189	0,514
55	2151	4958	7109	0,517
60	1820	4350	6170	0,526
65	2407	4384	6791	
70	1983	2348	4331	0,505
75	1217	1125	2342	
80	1185	1021	2206	0,472
85	632	478	1110	
90	425	330	755	0,501
120	1480	854	2334	
150	904	398	1302	
210	268	131	399	
270	536	211	747	
330	221	61	282	
390	142	43	185	0,451

V4				
Zeit	TS	TZ	TG	u_m
[min]	[g]	[g]	[g]	[m/s]
0	0	0	0	0,476
5	84	22	106	
10	1635	541	2176	0,539
15	6354	3914	10268	
20	3517	2940	6457	0,548
25	3615	3725	7340	
30	1232	3031	4263	0,568
35	1461	3742	5203	
40	1971	4702	6673	0,551
45	783	3827	4610	
50	1235	5387	6622	0,525
55	975	4423	5398	
60	966	4446	5412	0,516
65	787	4276	5063	
70	665	4666	5331	0,514
75	440	4101	4541	
80	494	4414	4908	0,501
85	471	4592	5063	
90	1176	5424	6600	0,520
95	1387	4795	6182	
100	729	4358	5087	0,520

Fortsetzung V4				
Zeit	TS	TZ	TG	u_m
[min]	[g]	[g]	[g]	[m/s]
105	850	4976	5826	
110	565	4716	5281	0,524
115	874	4637	5511	
120	759	4762	5521	0,520
125	311	2839	3150	
130	572	2295	2867	
135	294	1023	1317	0,486
140	168	433	601	
145	105	243	348	
150	201	483	684	0,461
155	250	643	893	
165	974	1608	2582	
180	374	391	765	
210	218	374	592	
270	438	613	1051	
330	192	283	475	
390	134	142	276	
450	292	356	648	
510	244	190	434	
570	139	137	276	
630	67	53	120	0,463

V5				
Zeit [min]	TS [g]	TZ [g]	TG [g]	u_m [m/s]
0	0	0	0	0,528
5	277	5	282	
10	1101	287	1388	0,630
15	2807	1084	3891	
20	4863	3711	8574	0,559
25	4641	3898	8539	
30	3290	4118	7408	0,460
35	4174	4653	8827	
40	1363	4388	5751	0,497
45	2015	4285	6300	
50	2035	3963	5998	0,540
55	1874	4842	6716	
60	2225	5357	7582	0,504
65	1925	4245	6170	
70	1140	4480	5620	0,477
75	2166	4996	7162	
80	1880	4726	6606	0,504
85	1192	3624	4816	
90	972	3643	4615	0,525
95	1099	4304	5403	
100	1368	5291	6659	0,511
105	1103	4716	5819	
110	402	3764	4166	0,504
115	626	4750	5376	
120	723	4723	5446	0,500
125	1226	5327	6553	
130	1216	5337	6553	0,501
135	815	4150	4965	
140	806	5660	6466	0,499
145	736	4475	5211	
150	1412	5035	6447	0,491
155	584	3050	3634	
160	957	5161	6118	0,537
165	634	4152	4786	
170	601	4816	5417	0,494
175	579	3576	4155	
180	670	6132	6802	0,510
185	367	3604	3971	
190	974	5602	6576	0,501
195	1049	4726	5775	
200	758	3429	4187	0,544
205	391	4059	4450	
210	381	5122	5503	0,517
215	351	4670	5021	
220	469	5740	6209	0,550
225	552	5180	5732	
230	417	4406	4823	0,491
235	706	4814	5520	
240	517	2961	3478	0,506
245	699	5534	6233	
250	557	5253	5810	0,572
255	645	3691	4336	
260	723	3677	4400	0,480
265	260	4185	4445	
270	195	4377	4572	0,525

Fortsetzung V5				
Zeit [min]	TS [g]	TZ [g]	TG [g]	u_m [m/s]
275	152	4519	4671	
280	291	4883	5174	0,561
285	162	5081	5243	
290	205	5518	5723	0,542
295	286	5310	5596	
300	147	4163	4310	0,520
305	259	5303	5562	
310	174	4418	4592	0,536
315	146	4989	5135	
320	123	5172	5295	0,595
325	186	4840	5026	
330	113	4268	4381	0,569
335	111	5195	5306	
340	89	5156	5245	0,538
345	99	4841	4940	
350	174	5185	5359	0,523
355	253	5367	5620	
360	317	5273	5590	0,516
365	354	4642	4996	
370	771	4593	5364	0,535
375	919	5336	6255	
380	637	4196	4833	0,510
385	670	4447	5117	
390	1054	5016	6070	0,543
395	1055	5075	6130	
400	850	3336	4186	0,520
405	934	3809	4743	
410	770	3971	4741	0,535
415	809	4512	5321	
420	735	4158	4893	0,538
425	923	4655	5578	
430	717	4106	4823	0,548
435	666	4765	5431	
440	616	4255	4871	0,578
445	728	5489	6217	
450	415	4027	4442	0,509
455	323	3671	3994	
460	518	6558	7076	0,550
465	671	6546	7217	
470	465	3728	4193	0,545
475	292	4862	5154	
480	252	4043	4295	0,555
485	302	4415	4717	
490	237	2283	2520	0,508
495	567	1652	2219	
500	287	655	942	0,494
505	64	312	376	
510	57	217	274	0,493
525	474	2099	2573	0,496
540	437	1149	1586	0,469
570	333	631	964	0,453
630	259	350	609	0,461
690	119	143	262	0,430
750	37	67	104	0,460

V6				
Zeit	TS	TZ	TG	u_m
[min]	[g]	[g]	[g]	[m/s]
0	0	0	0	0,504
5	717	306	1023	
10	6458	6701	13159	0,558
15	3712	9236	12948	
20	2402	8427	10829	0,577
25	2733	9264	11997	
30	2549	7794	10343	0,547
35	2982	11491	14473	
40	2166	10548	12714	0,489
45	3458	7871	11329	
50	3729	9233	12962	0,557
55	3901	9286	13187	
60	3120	8922	12042	0,555
65	3624	8077	11701	
70	6593	4291	10884	
75	2103	1073	3176	0,502
80	434	175	609	
85	348	163	511	
90	1173	359	1532	0,522
95	477	187	664	
105	556	172	728	
120	504	126	630	
150	600	193	793	
210	594	130	724	
270	239	48	287	
330	103	24	127	
390	49	10	59	0,550

V7				
Zeit	TS	TZ	TG	u_m
[min]	[g]	[g]	[g]	[m/s]
0	0	0	0	0,524
5	1556	13920	15476	
10	1318	37732	39050	0,690
15	676	38994	39670	
20	665	41050	41715	0,694
25	659	39869	40528	
30	367	38633	39000	0,673
35	273	38804	39077	
40	173	40386	40559	0,694
45	462	41287	41749	
50	529	41070	41599	0,708
55	368	39546	39914	
60	323	38361	38684	0,679
65	5924	19575	25499	
70	2781	2041	4822	0,527
75	2703	457	3160	
80	1799	221	2020	0,567
85	693	107	800	
90	400	48	448	0,555
120	640	100	740	0,560
150	110	15	125	0,498
180	155	25	180	0,475
240	1431	177	1608	0,553
300	658	73	731	0,512
360	60	8	68	0,505

V8				
Zeit	TS	TZ	TG	u_m
[min]	[g]	[g]	[g]	[m/s]
0	0	0	0	0,509
5	378	6	384	
10	5363	386	5749	0,563
15	5745	1820	7565	
20	4876	2942	7818	0,639
25	5047	2440	7487	
30	3381	2290	5671	0,683
35	3431	2834	6265	
40	2785	3082	5867	0,511
45	2674	2814	5488	
50	1527	3408	4935	0,917
55	2198	2952	5150	
60	1856	3074	4930	0,663
65	945	2512	3457	
70	96	662	758	0,529
75	24	358	382	0,565
90	139	538	677	0,538
120	78	288	366	0,609
150	39	304	343	0,617
210	40	180	220	0,565
270	47	186	233	0,660
330	20	62	82	0,547

V9				
Zeit	TS	TZ	TG	u_m
[min]	[g]	[g]	[g]	[m/s]
0	0	0	0	0,502
5	48	1	49	
10	24	7	31	0,526
15	13	6	19	
20	32	8	40	0,483
25	30	10	40	
30	34	5	39	0,490
35	16	8	24	
40	29	4	33	0,524
45	51	37	88	
50	287	19	306	0,522
55	604	61	665	
60	113	9	122	0,530
65	98	33	131	
70	130	22	152	0,473
75	57	11	68	
80	20	17	37	0,534
85	12	18	30	
90	18	22	40	0,536
95	41	25	66	
100	26	33	59	0,525
105	82	64	146	

Fortsetzung V9				
Zeit [min]	TS [g]	TZ [g]	TG [g]	u_m [m/s]
110	130	57	187	0,516
115	337	272	609	
120	540	309	849	0,511
125	211	41	252	
130	88	5	93	0,507
135	54	24	78	0,486
150	79	21	100	0,499
210	260	72	332	0,499
270	31	1	32	0,493

V10				
Zeit [min]	TS [g]	TZ [g]	TG [g]	u_m [m/s]
0	0	0	0	0,505
5	17	3	20	
10	56	2	58	0,506
15	330	16	346	
20	1366	67	1433	0,521
25	664	132	796	
30	240	121	361	0,530
35	195	129	324	
40	195	323	518	0,519
45	124	380	504	
50	120	361	481	0,574
55	331	964	1295	
60	689	1059	1748	0,698
65	96	275	371	
70	20	64	84	0,528
75	13	50	63	0,497
90	813	1183	1996	0,568
105	260	365	625	0,561
120	82	94	176	0,545
150	36	11	47	
180	16	31	47	
210	209	358	567	
240	290	669	959	
270	38	92	130	
330	27	22	49	0,535

V11				
Zeit [min]	TS [g]	TZ [g]	TG [g]	u_m [m/s]
0	0	0	0	0,571
5	17	8	25	
10	369	176	545	0,592
15	1408	1239	2647	
20	1062	3612	4674	0,666
25	1424	6821	8245	
30	849	8553	9402	0,612
35	698	5567	6265	
40	919	10263	11182	0,642
45	1031	10596	11627	
50	851	7050	7901	0,551
55	616	8088	8704	
60	749	8788	9537	0,607
65	122	4790	4912	
70	155	1664	1819	0,572
75	701	4182	4883	
80	441	1821	2262	0,606
85	202	1174	1376	
90	203	672	875	0,615
105	549	1228	1777	0,573
120	639	1866	2505	0,591
150	621	1278	1899	0,534
210	183	421	604	0,530
270	203	500	703	0,527
330	123	214	337	0,513
390	37	77	114	0,517

V12				
Zeit [min]	TS [g]	TZ [g]	TG [g]	u_m [m/s]
0	0	0	0	0,478
5	285	22	307	
10	305	5	310	0,510
15	721	26	747	
20	78	10	88	0,499
25	384	71	455	
30	98	18	116	0,479
35	125	53	178	
40	332	76	408	0,502
45	137	15	152	
50	141	23	164	0,570
55	16	10	26	
60	29	35	64	0,677
120	92	34	126	0,596

V13							
Zeit	TS	TZ	TG	TZ 5-8 mm	TZ 8-16 mm	TZ 16-32 mm	u_m
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[m/s]
0	0	0	0	0	0	0	0,522
5	68	1	69	1	0	0	
10	84	5	89	1	4	0	0,523
15	114	19	133	1	18	0	
20	168	42	210	1	18	23	0,528
25	204	30	234	1	22	7	
30	50	9	59	2	7	0	0,500
35	52	9	61	0	9	0	
40	61	15	76	1	14	0	0,504
45	81	34	115	1	17	16	
50	70	39	109	1	15	23	0,524
55	9	1	10	0	1	0	
60	125	45	170	2	34	9	0,479
65	104	74	178	1	35	38	
70	106	34	140	0	24	10	
75	37	9	46	0	9	0	0,520
90	152	132	284	1	83	48	
120	229	145	374	0	79	66	
180	246	221	467	1	112	108	0,496
240	80	57	137	0	42	15	

V14							
Zeit	TS	TZ	TG	TZ 5-8 mm	TZ 8-16 mm	TZ 16-32 mm	u_m
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[m/s]
0	0	0	0	0	0	0	0,538
5	40	6	46	1	0	5	
10	51	4	55	1	0	3	0,532
15	92	8	100	1	1	6	
20	30	9	39	2	0	7	0,501
25	406	129	535	6	5	118	
30	773	162	935	5	27	130	0,536
35	179	54	233	3	0	51	
40	48	72	120	2	1	69	0,537
45	51	91	142	7	20	64	
50	349	323	672	7	63	253	0,571
55	238	140	378	2	41	97	
60	505	804	1309	33	238	533	0,530
65	109	1324	1433	213	529	582	
70	223	2117	2340	329	912	876	0,643
75	222	1675	1897	260	717	698	
80	1298	2819	4117	516	1132	1171	0,656
85	197	2016	2213	445	807	764	
90	777	3998	4775	916	1612	1470	0,567
95	277	1108	1385	262	452	394	
100	40	227	267	65	104	58	0,610
105	50	280	330	62	102	116	
120	53	279	332	60	103	116	0,537
150	52	613	665	213	261	139	0,529
210	24	360	384	124	151	85	
270	107	1127	1234	404	476	247	
330	75	394	469	202	151	41	0,513
390	26	150	176	65	58	27	0,494
450	33	244	277	90	66	88	0,484
510	66	417	483	167	151	99	0,522
570	21	148	169	69	58	21	0,531

V15				
Zeit	TS	TZ	TG	u_m
[min]	[g]	[g]	[g]	[m/s]
0	0	0	0	0,421
5	3089	38	3127	0,548
10	23034	3605	26639	0,532
15	15089	2753	17842	
20	8082	2977	11059	0,546
25	3043	2188	5231	
30	5211	4213	9424	0,554
35	4212	4691	8903	
40	3970	3496	7466	0,534
45	1694	4151	5845	
50	1534	3504	5038	0,573
55	2056	4405	6461	
60	2790	4644	7434	0,558
65	298	649	947	0,484
70	161	381	542	0,485
75	57	202	259	0,466
90	93	353	446	0,474
120	106	361	467	0,464
150	79	215	294	0,456
210	110	250	360	0,452
270	172	183	355	0,451
330	122	208	330	0,447
390	142	187	329	0,433
450	69	69	138	0,434

V16				
Zeit	TS	TZ	TG	u_m
[min]	[g]	[g]	[g]	[m/s]
0	0	0	0	0,498
5	4171	48	4219	0,547
10	12512	1778	14290	0,584
15	15794	4626	20420	
20	12285	4740	17025	0,552
25	11053	3732	14785	
30	3765	2321	6086	0,542
35	5687	5245	10932	
40	4115	2519	6634	0,540
45	2784	4094	6878	
50	4066	4517	8583	0,553
55	1840	3474	5314	
60	2215	4738	6953	0,546
65	1926	3842	5768	
70	1950	2340	4290	0,497
75	1230	921	2151	
80	409	286	695	0,436
85	219	144	363	
90	282	184	466	0,498
120	506	231	737	0,470
150	263	176	439	0,474
210	1005	650	1655	0,468
270	382	182	564	0,446
330	169	62	231	0,456
390	136	74	210	0,472
450	79	50	129	0,456

V17				
Zeit	TS	TZ	TG	u_m
[min]	[g]	[g]	[g]	[m/s]
0	0	0	0	0,502
5	2719	47	2766	0,624
10	5278	1153	6431	0,612
15	5149	2298	7447	
20	7801	5362	13163	0,608
25	6964	4319	11283	
30	2685	3334	6019	0,609
35	4759	4912	9671	
40	3082	3726	6808	0,603
45	3165	3444	6609	
50	1749	2794	4543	0,619
55	4113	5862	9975	
60	1226	3840	5066	0,594
65	822	2419	3241	0,504
70	570	794	1364	0,503
75	274	497	771	0,523
90	657	1008	1665	0,505
120	948	956	1904	0,503
180	606	389	995	0,479
240	125	88	213	0,472

V18				
Zeit	TS	TZ	TG	u_m
[min]	[g]	[g]	[g]	[m/s]
0	0	0	0	0,584
5	3004	50	3054	0,633
10	6358	1209	7567	0,572
15	10247	1948	12195	
20	1605	718	2323	0,643
25	6430	1888	8318	
30	3815	1811	5626	0,607
35	1719	1590	3309	
40	456	1139	1595	0,649
45	1340	1424	2764	
50	6423	5512	11935	0,669
55	1361	2412	3773	
60	2321	6574	8895	0,689
65	425	655	1080	0,579
70	8	26	34	0,562
75	14	51	65	0,547
90	430	789	1219	0,521
120	327	540	867	0,550
180	1617	1845	3462	0,547
240	709	654	1363	0,571
300	1127	1060	2187	0,590
360	383	208	591	0,619
420	104	42	146	0,589

A.4 Sieblinien des erodierten Sohlenmaterials

d_{mG} = mittlerer Korndurchmesser des erodierten Sohlenmaterials

V0		Siebdurchgang [Gew.-%]						d_{mG} [mm]
Zeit [min]	3 mm	5 mm	8 mm	16 mm	32 mm	64 mm		
V0.1	5	16,08	20,42	27,10	72,47	100,00	100,00	12,98
	10	23,12	29,57	37,87	83,30	99,47	100,00	10,85
	15	22,45	28,31	35,20	76,33	97,77	100,00	12,28
	20	23,77	30,55	38,52	86,29	100,00	100,00	10,29
	25	53,00	61,51	67,19	95,58	100,00	100,00	6,23
	30	9,72	12,52	17,66	69,91	100,00	100,00	14,13
	35	22,44	28,44	36,58	82,17	99,11	100,00	11,18
	40	37,03	45,04	52,73	85,98	100,00	100,00	8,91
	45	43,12	52,79	60,35	94,55	100,00	100,00	7,15
	60	42,58	50,97	58,59	88,27	100,00	100,00	8,06
	90	36,46	43,42	49,95	82,45	96,92	100,00	10,28
	120	46,88	55,06	62,18	89,09	100,00	100,00	7,57
	150	37,66	45,64	54,88	90,98	100,00	100,00	8,17
	180	41,82	50,07	56,78	83,92	100,00	100,00	8,71
	210	52,52	61,15	69,06	87,77	100,00	100,00	7,09
	270	44,27	51,91	56,49	87,02	100,00	100,00	8,26
	330	29,90	36,02	42,42	79,00	100,00	100,00	10,69
	390	26,03	32,67	39,50	79,90	97,26	100,00	11,56
	450	24,47	29,51	34,95	74,36	94,44	100,00	13,26
	510	34,12	41,12	48,12	85,87	100,00	100,00	9,34
	570	26,29	33,15	39,86	82,38	100,00	100,00	10,56
	630	36,81	45,14	52,08	87,15	100,00	100,00	8,81
	690	39,46	48,30	54,42	90,48	100,00	100,00	8,14
V0.2	5	8,35	11,68	18,54	67,95	95,67	100,00	15,41
	10	34,60	42,95	51,51	90,47	100,00	100,00	8,54
	15	25,22	31,40	38,69	81,09	100,00	100,00	10,85
	20	37,78	46,90	55,44	90,88	100,00	100,00	8,12
	25	43,81	54,52	63,55	96,99	100,00	100,00	6,62
	30	40,71	50,00	56,43	83,57	100,00	100,00	8,80
	60	31,35	37,78	43,86	75,69	100,00	100,00	10,93
	90	18,34	22,80	27,39	80,51	100,00	100,00	11,89
	120	19,95	26,28	32,85	85,64	100,00	100,00	10,86

V1		Siebdurchgang [Gew.-%]					d_{mG} [mm]	
Zeit [min]	3 mm	5 mm	8 mm	16 mm	32 mm	64 mm		
	5	17,05	21,71	26,36	100,00	100,00	100,00	9,67
	10	11,38	15,08	20,91	85,78	100,00	100,00	11,95
	15	17,58	21,95	28,22	80,76	100,00	100,00	11,86
	20	24,23	30,28	37,40	82,04	100,00	100,00	10,86
	25	24,37	29,46	35,35	78,53	100,00	100,00	11,41
	30	19,80	25,02	32,51	83,94	100,00	100,00	11,12
	35	18,53	22,53	28,86	84,46	100,00	100,00	11,34
	40	12,92	16,21	23,00	78,09	90,47	100,00	14,98
	45	15,09	19,53	27,30	81,32	100,00	100,00	11,95
	50	18,37	24,67	35,43	90,55	100,00	100,00	10,20
	55	7,67	12,17	23,02	96,03	100,00	100,00	10,75
	60	20,52	26,38	33,94	80,61	100,00	100,00	11,39

Fortsetzung V1							
Zeit [min]	Siebdurchgang [Gew.-%]						d _{mG} [mm]
	3 mm	5 mm	8 mm	16 mm	32 mm	64 mm	
65	21,18	26,79	33,05	79,00	100,00	100,00	11,61
70	18,20	23,57	30,21	76,08	100,00	100,00	12,25
75	26,84	32,98	39,63	82,40	100,00	100,00	10,57
80	17,62	22,22	29,09	80,22	100,00	100,00	11,86
85	18,75	24,28	35,10	78,37	100,00	100,00	11,68
90	23,32	29,36	36,29	85,25	100,00	100,00	10,57
95	20,38	26,94	34,99	85,66	100,00	100,00	10,72
100	18,51	22,69	29,76	90,74	100,00	100,00	10,54
105	12,19	16,77	25,06	81,59	100,00	100,00	12,17
110	11,80	16,42	24,55	84,60	100,00	100,00	11,85
115	24,22	32,24	40,68	84,63	100,00	100,00	10,32
120	26,61	33,62	41,20	85,55	100,00	100,00	10,09
125	26,63	33,15	41,30	79,35	100,00	100,00	10,85
130	18,52	25,00	32,41	100,00	100,00	100,00	9,22
135	18,66	26,41	35,56	97,18	100,00	100,00	9,34
150	38,36	47,76	54,91	91,38	100,00	100,00	8,05
165	39,76	51,63	59,05	90,21	100,00	100,00	7,84
180	60,34	72,63	78,77	97,21	100,00	100,00	4,97
210	58,05	72,41	78,16	94,83	100,00	100,00	5,35
270	38,60	48,05	58,52	97,95	100,00	100,00	7,05
330	53,06	63,63	68,85	91,21	93,99	100,00	8,06
390	48,58	56,82	63,35	91,19	100,00	100,00	7,18
450	41,72	49,32	52,70	79,39	100,00	100,00	9,51
510	62,20	75,12	80,86	100,00	100,00	100,00	4,43
570	44,00	53,33	56,00	100,00	100,00	100,00	6,71

V2							
Zeit [min]	Siebdurchgang [Gew.-%]						d _{mG} [mm]
	3 mm	5 mm	8 mm	16 mm	32 mm	64 mm	
5	38,54	47,92	52,60	89,06	100,00	100,00	8,44
10	8,90	10,99	13,87	84,82	100,00	100,00	12,61
15	3,85	5,47	11,71	80,51	100,00	100,00	13,48
20	1,83	3,06	10,52	81,43	100,00	100,00	13,54
25	8,15	11,98	21,66	78,75	100,00	100,00	12,89
30	12,19	17,15	41,17	83,87	100,00	100,00	11,00
35	18,31	22,24	29,97	72,49	100,00	100,00	12,73
40	21,11	27,12	34,99	76,37	96,55	100,00	12,64
45	5,20	9,17	20,51	83,93	100,00	100,00	12,47
50	8,63	13,73	23,03	75,32	100,00	100,00	13,18
55	26,54	36,21	47,23	87,10	100,00	100,00	9,51
60	24,01	32,30	41,56	88,52	100,00	100,00	9,80
65	13,72	18,42	25,56	74,44	100,00	100,00	12,92
70	8,33	12,50	24,24	93,94	100,00	100,00	10,91
75	22,53	32,81	43,23	81,38	100,00	100,00	10,59
90	29,38	39,05	49,67	87,72	100,00	100,00	9,18
120	39,43	51,51	61,84	93,64	100,00	100,00	7,29
150	31,17	40,58	46,75	83,44	100,00	100,00	9,78
210	49,51	62,50	70,29	97,24	100,00	100,00	5,91
270	55,19	67,76	74,86	86,89	100,00	100,00	6,66
330	29,80	38,37	46,08	86,82	100,00	100,00	9,49
390	46,04	56,40	63,72	94,21	100,00	100,00	6,86
450	38,46	47,93	55,62	86,98	100,00	100,00	8,54
510	49,25	62,69	73,13	100,00	100,00	100,00	5,43

V3.1 Zeit [min]	Siebdurchgang [Gew.-%]						d _{mG} [mm]
	3 mm	5 mm	8 mm	16 mm	32 mm	64 mm	
5	17,83	21,66	26,11	67,83	100,00	100,00	13,53
10	5,80	7,54	14,50	90,50	100,00	100,00	12,04
15	5,43	8,03	16,81	82,52	100,00	100,00	12,86
20	14,06	19,42	27,85	78,54	100,00	100,00	12,28
25	5,14	7,59	15,38	77,50	100,00	100,00	13,56
30	2,33	4,23	13,83	77,71	100,00	100,00	13,76
35	11,88	19,20	28,68	79,25	100,00	100,00	12,20
40	24,46	33,74	42,37	85,16	100,00	100,00	10,12
45	14,16	18,76	28,88	82,92	100,00	100,00	11,71
50	13,92	18,75	25,96	70,47	100,00	100,00	13,37
55	23,34	32,25	41,91	82,28	100,00	100,00	10,55
60	11,13	16,19	24,81	78,66	100,00	100,00	12,57
65	31,93	41,57	47,96	81,65	100,00	100,00	9,89
70	48,58	59,19	67,56	96,26	100,00	100,00	6,28
75	48,02	60,07	64,36	79,87	100,00	100,00	8,41
90	59,08	69,66	74,43	94,71	100,00	100,00	5,62
120	56,03	66,79	73,08	96,28	100,00	100,00	5,64
150	44,44	53,51	59,42	86,60	100,00	100,00	8,11
210	57,34	66,74	71,33	94,72	100,00	100,00	5,89
270	32,41	39,31	45,86	74,14	100,00	100,00	10,95
330	38,46	50,77	53,85	83,08	100,00	100,00	9,03
390	27,78	32,87	37,50	96,30	100,00	100,00	9,00
450	53,26	67,39	67,39	100,00	100,00	100,00	5,54

V3.2 Zeit [min]	Siebdurchgang [Gew.-%]						d _{mG} [mm]
	3 mm	5 mm	8 mm	16 mm	32 mm	64 mm	
5	24,06	28,30	32,55	60,38	100,00	100,00	13,78
10	3,85	5,19	11,22	82,24	100,00	100,00	13,31
15	4,15	6,10	12,76	71,30	100,00	100,00	14,51
20	9,94	13,84	21,02	78,80	100,00	100,00	12,84
25	8,33	11,21	18,20	74,55	97,61	100,00	14,18
30	15,85	21,96	30,36	80,95	98,23	100,00	12,18
35	14,62	19,78	28,48	81,90	100,00	100,00	11,82
40	8,67	13,59	23,51	79,68	100,00	100,00	12,63
45	35,80	46,39	53,41	94,34	100,00	100,00	7,86
50	7,20	9,17	17,52	77,71	100,00	100,00	13,34
55	19,00	26,32	33,91	73,63	97,66	100,00	12,82
60	20,32	27,16	36,92	85,11	100,00	100,00	10,67
65	33,60	42,83	48,95	88,39	100,00	100,00	8,96
70	38,82	48,70	55,28	87,86	100,00	100,00	8,42
75	39,35	46,74	52,62	91,10	100,00	100,00	8,22
90	45,77	54,90	60,87	91,68	100,00	100,00	7,36
120	42,43	53,24	61,23	95,17	100,00	100,00	7,03
150	55,25	67,07	72,64	97,34	100,00	100,00	5,54
210	66,11	78,71	84,59	100,00	100,00	100,00	4,06
270	58,20	68,59	73,67	96,07	100,00	100,00	5,54
330	66,37	78,07	83,63	95,61	100,00	100,00	4,64
390	72,59	84,44	88,15	100,00	100,00	100,00	3,59
450	64,10	76,92	83,76	100,00	100,00	100,00	4,19

V3.3 Zeit [min]	Siebdurchgang [Gew.-%]						d _{mG} [mm]
	3 mm	5 mm	8 mm	16 mm	32 mm	64 mm	
5	17,19	20,70	27,37	95,09	100,00	100,00	10,22
10	8,96	11,46	57,59	84,58	100,00	100,00	10,22
15	4,30	5,84	12,59	64,35	100,00	100,00	15,35
20	17,10	23,04	32,42	83,21	100,00	100,00	11,31
25	10,06	13,41	22,16	76,44	96,62	100,00	13,88
30	12,47	19,31	29,62	82,80	100,00	100,00	11,70
35	15,38	21,93	32,00	87,81	100,00	100,00	10,85
40	29,08	37,71	46,63	89,63	100,00	100,00	9,16
45	30,01	36,95	43,82	86,95	100,00	100,00	9,63
50	28,49	35,61	43,03	88,20	100,00	100,00	9,59
55	17,65	22,11	31,48	85,99	100,00	100,00	11,04
60	15,72	20,98	29,72	75,59	100,00	100,00	12,45
65	27,83	34,00	40,69	77,54	100,00	100,00	11,05
70	15,90	20,35	26,72	72,38	94,93	100,00	14,24
75	39,95	51,62	60,16	96,30	100,00	100,00	7,05
80	46,08	56,57	63,67	93,43	100,00	100,00	6,95
85	56,99	66,13	73,12	94,35	100,00	100,00	5,86
90	54,36	63,76	69,69	95,47	100,00	100,00	6,03
95	9,92	13,86	21,88	85,05	100,00	100,00	12,04
105	35,32	44,08	51,89	90,02	100,00	100,00	8,53
120	46,19	55,25	60,79	83,88	100,00	100,00	8,28
150	52,81	61,90	68,60	89,42	100,00	100,00	6,89
210	62,90	72,13	76,55	93,33	100,00	100,00	5,53
270	69,49	80,79	85,88	100,00	100,00	100,00	3,85
330	67,74	78,49	82,80	100,00	100,00	100,00	4,11

V3.4 Zeit [min]	Siebdurchgang [Gew.-%]						d _{mG} [mm]
	3 mm	5 mm	8 mm	16 mm	32 mm	64 mm	
5	21,62	32,43	37,84	100,00	100,00	100,00	8,68
10	3,98	5,37	10,54	92,05	100,00	100,00	12,16
15	4,02	5,41	12,45	68,45	100,00	100,00	14,89
20	10,59	13,25	20,27	69,59	97,45	100,00	14,60
25	10,90	13,56	20,70	77,58	97,62	100,00	13,56
30	10,44	15,10	24,26	77,75	100,00	100,00	12,75
35	11,30	14,30	21,64	81,64	100,00	100,00	12,43
40	11,78	13,99	24,45	87,92	100,00	100,00	11,52
45	9,32	13,50	21,95	71,69	92,94	100,00	15,36
50	22,50	27,28	34,14	75,41	100,00	100,00	11,94
55	15,37	20,06	28,96	80,26	100,00	100,00	11,96
60	12,80	15,31	22,56	76,28	100,00	100,00	12,96
65	22,12	29,33	36,28	78,58	100,00	100,00	11,40
70	44,90	52,45	58,06	83,06	100,00	100,00	8,63
75	38,87	46,79	56,98	95,85	100,00	100,00	7,42
80	38,40	48,10	55,27	96,62	100,00	100,00	7,39
85	45,24	55,65	61,90	94,05	100,00	100,00	7,01
90	45,00	52,14	59,76	83,57	87,86	100,00	11,39
105	36,39	43,20	52,04	95,92	100,00	100,00	7,82
120	28,79	37,12	45,45	86,74	100,00	100,00	9,59
150	36,94	44,77	51,26	87,39	100,00	100,00	8,83
210	24,36	30,03	37,24	82,86	100,00	100,00	10,77
270	36,16	46,20	54,47	92,94	100,00	100,00	7,97
330	33,73	40,62	45,09	81,07	100,00	100,00	10,10
390	39,75	47,67	53,84	87,55	100,00	100,00	8,54
450	43,11	51,53	58,93	95,66	100,00	100,00	7,13
510	46,36	53,64	60,93	91,39	100,00	100,00	7,40

V3.5 Zeit [min]	Siebdurchgang [Gew.-%]						d _{mG} [mm]
	3 mm	5 mm	8 mm	16 mm	32 mm	64 mm	
5	35,42	40,83	45,42	81,67	100,00	100,00	9,97
10	10,34	12,89	19,26	82,44	100,00	100,00	12,52
15	10,93	13,59	20,47	77,06	100,00	100,00	13,07
20	10,11	15,87	25,05	83,51	100,00	100,00	12,00
25	23,84	29,64	37,23	85,20	100,00	100,00	10,51
30	12,04	15,48	23,10	78,38	100,00	100,00	12,69
35	14,26	18,73	24,58	79,96	100,00	100,00	12,30
40	6,37	8,12	14,49	72,41	100,00	100,00	14,18
45	3,03	4,92	13,38	83,53	100,00	100,00	13,05
50	13,50	17,38	23,84	71,10	97,59	100,00	14,03
55	15,88	20,66	29,00	78,72	95,40	100,00	13,23
60	14,61	18,56	24,93	68,58	96,22	100,00	14,55
65	19,14	25,51	32,94	78,74	92,06	100,00	13,62
70	30,28	38,27	45,90	86,12	100,00	100,00	9,58
75	26,07	32,75	40,60	85,80	100,00	100,00	10,13
80	30,22	37,93	45,55	90,41	100,00	100,00	9,09
85	29,82	38,28	46,57	88,04	100,00	100,00	9,32
90	36,82	47,27	54,63	89,31	100,00	100,00	8,36
120	45,80	55,22	62,32	92,49	100,00	100,00	7,17
150	45,23	53,33	58,87	86,14	100,00	100,00	8,18
210	55,06	66,67	73,41	95,51	100,00	100,00	5,73
270	51,41	62,48	70,54	98,69	100,00	100,00	5,68
330	63,93	73,97	80,37	94,52	100,00	100,00	5,11
390	50,70	61,27	69,01	95,07	100,00	100,00	6,25

V4 Zeit [min]	Siebdurchgang [Gew.-%]						d _{mG} [mm]
	3 mm	5 mm	8 mm	16 mm	32 mm	64 mm	
5	39,29	47,62	52,38	88,10	100,00	100,00	8,57
10	7,77	9,30	13,64	76,45	100,00	100,00	13,69
15	5,05	7,46	15,20	73,42	99,26	100,00	14,24
20	12,84	17,57	26,11	81,60	98,72	100,00	12,38
25	8,94	14,89	23,92	73,89	100,00	100,00	13,27
30	14,93	20,39	29,77	88,58	100,00	100,00	10,92
35	15,46	21,44	30,24	88,93	100,00	100,00	10,82
40	19,58	26,16	34,37	85,98	98,27	100,00	11,16
45	15,30	22,88	32,52	90,75	100,00	100,00	10,44
50	22,31	28,91	36,73	84,20	100,00	100,00	10,71
55	18,68	24,97	32,40	84,31	100,00	100,00	11,10
60	24,90	33,54	41,67	83,23	100,00	100,00	10,38
65	23,66	31,20	39,51	79,41	93,22	100,00	12,67
70	23,15	29,20	38,12	84,72	100,00	100,00	10,54
75	18,48	22,86	33,95	88,22	100,00	100,00	10,60
80	8,40	14,34	26,84	88,93	100,00	100,00	11,32
85	4,09	7,10	17,63	87,53	100,00	100,00	12,26
90	15,44	21,92	31,41	79,64	100,00	100,00	11,86
95	32,46	40,99	48,80	86,51	100,00	100,00	9,26
100	18,83	23,85	32,64	79,92	100,00	100,00	11,64
105	13,91	17,95	27,35	77,29	100,00	100,00	12,49
110	4,56	11,31	21,17	85,22	100,00	100,00	12,23
115	24,65	31,43	38,90	81,19	100,00	100,00	10,84
120	16,62	21,89	30,54	79,19	100,00	100,00	11,94
125	11,74	16,78	30,87	90,94	100,00	100,00	10,73
130	31,31	39,53	42,40	84,08	100,00	100,00	9,96
135	37,59	51,06	59,57	90,43	100,00	100,00	7,84

Fortsetzung V4							
Zeit [min]	Siebdurchgang [Gew.-%]						d _{mG} [mm]
	3 mm	5 mm	8 mm	16 mm	32 mm	64 mm	
140	31,52	42,42	52,12	90,30	100,00	100,00	8,61
145	40,78	51,46	57,28	100,00	100,00	100,00	6,75
150	42,42	57,07	63,64	90,91	100,00	100,00	7,32
155	42,28	52,44	59,35	100,00	100,00	100,00	6,58
165	63,23	75,73	80,83	93,02	100,00	100,00	5,23
180	54,72	63,61	68,19	80,32	100,00	100,00	7,93
210	66,05	79,53	85,12	100,00	100,00	100,00	4,00
270	60,00	73,72	81,16	98,37	100,00	100,00	4,69
330	51,05	64,74	76,32	100,00	100,00	100,00	5,16
390	62,41	74,44	81,20	100,00	100,00	100,00	4,42
450	41,24	51,89	61,86	89,69	100,00	100,00	7,71
510	56,43	67,22	73,86	94,61	100,00	100,00	5,77
570	56,52	67,39	79,71	100,00	100,00	100,00	4,79
630	71,21	84,85	89,39	100,00	100,00	100,00	3,54

V5							
Zeit [min]	Siebdurchgang [Gew.-%]						d _{mG} [mm]
	3 mm	5 mm	8 mm	16 mm	32 mm	64 mm	
5	38,63	46,21	54,51	100,00	100,00	100,00	7,06
10	11,53	13,71	18,26	86,19	100,00	100,00	12,07
15	6,63	8,41	14,64	78,91	100,00	100,00	13,38
20	4,09	6,42	14,15	77,26	100,00	100,00	13,71
25	13,32	20,36	30,17	80,39	100,00	100,00	11,92
30	8,24	13,01	21,55	71,88	100,00	100,00	13,70
35	30,95	39,43	46,86	86,56	100,00	100,00	9,43
40	10,20	18,42	26,71	77,62	92,15	100,00	14,43
45	21,34	30,07	37,02	81,74	100,00	100,00	10,97
50	23,29	30,57	37,00	84,91	100,00	100,00	10,54
55	8,96	16,33	24,44	78,60	100,00	100,00	12,63
60	22,25	31,69	39,82	82,20	95,73	100,00	11,73
65	30,29	40,73	48,26	87,74	100,00	100,00	9,19
70	11,49	20,70	29,12	83,68	100,00	100,00	11,60
75	22,21	31,02	38,00	76,96	100,00	100,00	11,45
80	20,59	29,73	36,97	77,29	100,00	100,00	11,53
85	27,77	38,17	45,72	92,03	100,00	100,00	8,93
90	22,53	32,20	38,58	83,44	100,00	100,00	10,61
95	15,65	23,11	39,49	76,89	100,00	100,00	11,71
100	20,32	29,46	36,62	80,48	100,00	100,00	11,18
105	26,47	39,26	45,69	81,87	100,00	100,00	10,15
110	12,69	22,89	31,09	88,56	100,00	100,00	10,83
115	3,51	13,26	23,80	88,66	100,00	100,00	11,65
120	5,95	16,46	26,14	87,83	100,00	100,00	11,49
125	38,34	52,37	59,05	88,50	100,00	100,00	8,05
130	16,61	27,80	34,21	78,21	93,42	100,00	13,28
135	45,64	57,18	62,94	87,61	100,00	100,00	7,68
140	23,82	35,36	40,45	81,14	100,00	100,00	10,68
145	19,02	28,67	33,83	74,73	100,00	100,00	12,07
150	24,65	34,63	39,87	75,99	93,20	100,00	12,96
155	21,58	32,71	40,58	90,58	100,00	100,00	9,65
160	17,76	29,57	36,68	84,33	100,00	100,00	10,77
165	18,14	27,60	32,81	85,02	100,00	100,00	10,94
170	6,99	20,97	26,29	79,53	100,00	100,00	12,35
175	6,04	17,79	24,87	73,40	100,00	100,00	13,26
180	5,07	16,72	26,27	80,45	100,00	100,00	12,38
185	11,44	29,70	38,69	97,00	100,00	100,00	9,26

Fortsetzung V5							
Zeit [min]	Siebdurchgang [Gew.-%]						d _{mG} [mm]
	3 mm	5 mm	8 mm	16 mm	32 mm	64 mm	
190	13,76	28,23	35,11	75,36	100,00	100,00	12,04
195	33,75	50,14	55,39	89,42	100,00	100,00	8,29
200	41,69	53,56	58,18	88,13	100,00	100,00	8,05
205	7,93	17,39	24,04	87,47	100,00	100,00	11,58
210	13,39	24,15	31,50	87,14	100,00	100,00	10,94
215	6,55	19,94	29,34	94,87	100,00	100,00	10,36
220	11,51	27,51	35,61	85,29	100,00	100,00	10,89
225	19,57	41,85	50,36	89,13	100,00	100,00	9,09
230	23,74	37,89	45,08	84,89	100,00	100,00	9,91
235	30,17	43,34	48,16	78,90	100,00	100,00	10,19
240	18,76	26,69	32,69	81,82	100,00	100,00	11,34
245	16,45	25,89	32,90	81,55	100,00	100,00	11,42
250	6,46	19,39	29,08	87,43	100,00	100,00	11,29
255	24,96	35,81	43,41	85,58	100,00	100,00	9,95
260	30,57	39,97	46,89	86,86	100,00	100,00	9,39
265	13,46	27,69	37,31	95,77	100,00	100,00	9,49
270	17,44	32,31	40,51	90,77	100,00	100,00	9,72
275	3,95	13,82	24,34	78,29	100,00	100,00	12,84
280	3,09	10,65	17,53	69,42	81,79	100,00	18,75
285	6,17	19,14	31,48	93,21	100,00	100,00	10,48
290	8,78	21,46	29,27	75,12	100,00	100,00	12,66
295	19,93	29,02	34,27	74,48	100,00	100,00	12,05
300	6,12	14,97	21,77	74,15	100,00	100,00	13,40
305	3,09	7,72	13,90	77,99	100,00	100,00	13,62
310	6,32	17,82	25,29	83,91	100,00	100,00	11,97
315	6,85	16,44	29,45	94,52	100,00	100,00	10,49
320	14,63	26,02	39,84	100,00	100,00	100,00	8,87
325	27,42	38,71	45,16	76,34	100,00	100,00	10,84
330	17,70	31,86	39,82	84,96	100,00	100,00	10,45
335	4,50	18,92	27,93	93,69	100,00	100,00	10,64
340	5,62	22,47	26,97	87,64	100,00	100,00	11,31
345	9,09	35,35	44,44	100,00	100,00	100,00	8,47
350	6,90	27,59	33,91	85,63	100,00	100,00	11,01
355	2,77	24,51	32,81	79,84	100,00	100,00	11,94
360	10,73	30,28	36,91	82,33	100,00	100,00	11,11
365	28,25	46,89	49,15	70,34	100,00	100,00	11,11
370	20,75	29,31	32,81	93,90	100,00	100,00	9,77
375	15,34	23,94	27,53	84,77	100,00	100,00	11,41
380	3,92	13,81	16,80	93,41	100,00	100,00	11,44
385	5,97	15,82	20,15	100,00	100,00	100,00	10,37
390	11,39	22,01	26,57	94,88	100,00	100,00	10,37
395	4,55	11,66	15,64	88,91	100,00	100,00	12,09
400	15,53	26,12	28,47	85,88	100,00	100,00	11,16
405	14,13	21,84	23,88	87,90	100,00	100,00	11,31
410	6,10	11,04	12,86	89,74	100,00	100,00	12,12
415	1,85	6,92	9,27	95,92	100,00	100,00	11,76
420	2,86	9,66	11,56	96,73	100,00	100,00	11,45
425	12,68	19,93	22,75	92,85	100,00	100,00	10,85
430	6,83	16,18	18,83	87,87	100,00	100,00	11,87
435	3,45	13,51	17,12	92,04	100,00	100,00	11,60
440	4,71	17,05	20,78	96,59	100,00	100,00	10,74
445	7,01	18,96	23,90	97,53	100,00	100,00	10,36
450	6,27	34,22	39,28	98,31	100,00	100,00	9,05
455	10,84	27,86	31,89	94,12	100,00	100,00	10,03
460	11,58	32,43	37,26	89,77	100,00	100,00	10,14

Fortsetzung V5							
Zeit [min]	Siebdurchgang [Gew.-%]						d _{mG} [mm]
	3 mm	5 mm	8 mm	16 mm	32 mm	64 mm	
465	40,09	63,04	66,92	94,93	100,00	100,00	6,55
470	37,63	52,47	55,05	93,55	100,00	100,00	7,68
475	23,63	38,70	43,84	97,26	100,00	100,00	8,47
480	7,14	24,60	30,95	96,03	100,00	100,00	10,01
485	3,97	22,52	29,80	88,74	100,00	100,00	11,06
490	12,24	47,26	54,01	81,86	100,00	100,00	9,78
495	63,32	83,60	86,60	97,00	100,00	100,00	4,24
500	59,23	71,08	73,87	87,11	100,00	100,00	6,52
505	29,69	54,69	60,94	85,94	100,00	100,00	8,38
510	47,37	61,40	68,42	85,96	100,00	100,00	7,41
525	46,20	70,25	76,16	98,10	100,00	100,00	5,36
540	65,22	83,75	86,73	100,00	100,00	100,00	3,83
570	72,97	87,39	90,69	97,00	100,00	100,00	3,73
630	73,36	82,63	86,10	100,00	100,00	100,00	3,73
690	68,91	80,67	85,71	100,00	100,00	100,00	3,89
750	75,68	81,08	89,19	100,00	100,00	100,00	3,55

V6							
Zeit [min]	Siebdurchgang [Gew.-%]						d _{mG} [mm]
	3 mm	5 mm	8 mm	16 mm	32 mm	64 mm	
5	14,94	18,44	22,77	100,00	100,00	100,00	9,99
10	8,31	10,74	17,02	71,13	100,00	100,00	14,09
15	8,98	11,49	18,46	70,21	100,00	100,00	14,09
20	13,97	17,91	26,95	81,51	100,00	100,00	12,01
25	5,60	8,34	15,72	69,56	100,00	100,00	14,47
30	2,80	5,23	13,30	74,75	100,00	100,00	14,11
35	8,31	13,06	23,47	79,11	97,94	100,00	13,22
40	9,22	14,68	23,59	79,54	100,00	100,00	12,60
45	19,13	25,86	41,48	82,06	100,00	100,00	10,84
50	14,11	19,50	27,35	76,23	100,00	100,00	12,58
55	23,72	29,34	35,90	78,92	100,00	100,00	11,35
60	23,50	30,11	37,12	81,08	100,00	100,00	11,00
65	14,13	19,82	28,06	78,63	97,83	100,00	12,76
70	42,39	50,86	56,72	85,66	97,43	100,00	9,10
75	56,70	64,87	69,37	91,83	100,00	100,00	6,41
80	46,93	55,66	60,85	85,38	100,00	100,00	8,07
85	55,33	67,46	75,15	98,22	100,00	100,00	5,29
90	45,54	53,16	59,39	87,45	100,00	100,00	8,00
95	50,75	60,60	65,74	91,65	100,00	100,00	6,85
105	43,25	52,19	58,03	89,05	100,00	100,00	7,95
120	60,84	70,48	75,70	96,39	100,00	100,00	5,29
150	59,52	70,58	76,87	95,24	100,00	100,00	5,39
210	64,21	73,46	78,25	97,09	100,00	100,00	4,92
270	78,30	89,79	92,77	100,00	100,00	100,00	3,08
330	82,35	92,16	100,00	100,00	100,00	100,00	2,55
390	79,59	87,76	91,84	100,00	100,00	100,00	3,13

V9 Zeit [min]	Siebdurchgang [Gew.-%]						d _{mG} [mm]
	3 mm	5 mm	8 mm	16 mm	32 mm	64 mm	
5	39,58	47,92	56,25	100,00	100,00	100,00	6,92
10	54,17	62,50	66,67	100,00	100,00	100,00	5,69
15	69,23	84,62	84,62	100,00	100,00	100,00	3,85
20	40,63	50,00	53,13	71,88	100,00	100,00	10,39
25	33,33	36,67	40,00	100,00	100,00	100,00	8,22
30	47,06	55,88	61,76	100,00	100,00	100,00	6,26
35	50,00	62,50	75,00	100,00	100,00	100,00	5,31
40	44,83	51,72	55,17	100,00	100,00	100,00	6,78
45	29,41	35,29	45,10	100,00	100,00	100,00	8,05
50	23,00	27,87	34,49	77,00	100,00	100,00	11,71
55	15,07	19,70	23,68	62,25	87,91	100,00	17,33
60	39,82	47,79	53,10	92,04	100,00	100,00	8,04
65	28,57	35,71	39,80	76,53	100,00	100,00	11,16
70	35,38	42,31	46,92	79,23	100,00	100,00	10,15
75	47,37	56,14	57,89	87,72	100,00	100,00	7,94
80	60,00	65,00	70,00	100,00	100,00	100,00	5,33
85	41,67	50,00	66,67	100,00	100,00	100,00	6,25
90	50,00	61,11	77,78	100,00	100,00	100,00	5,19
95	31,71	36,59	41,46	82,93	100,00	100,00	10,22
100	26,92	30,77	30,77	100,00	100,00	100,00	9,00
105	9,76	12,20	15,85	47,56	100,00	100,00	16,92
110	13,85	17,69	21,54	63,08	100,00	100,00	14,53
115	5,64	7,72	12,76	76,56	100,00	100,00	13,81
120	15,74	20,19	27,04	75,93	100,00	100,00	12,58
125	31,28	37,44	44,08	76,78	100,00	100,00	10,80
130	50,00	56,82	63,64	100,00	100,00	100,00	6,08
135	48,15	57,41	72,22	100,00	100,00	100,00	5,63
150	48,10	54,43	59,49	91,14	100,00	100,00	7,47
210	30,00	35,38	40,77	91,92	100,00	100,00	9,24
270	48,39	54,84	61,29	100,00	100,00	100,00	6,29

V10 Zeit [min]	Siebdurchgang [Gew.-%]						d _{mG} [mm]
	3 mm	5 mm	8 mm	16 mm	32 mm	64 mm	
5	76,47	88,24	88,24	100,00	100,00	100,00	3,41
10	21,43	23,21	26,79	64,29	100,00	100,00	13,80
15	19,39	23,03	25,45	54,24	100,00	100,00	15,13
20	23,66	28,79	34,51	73,26	95,31	100,00	13,24
25	27,90	33,18	39,06	74,51	100,00	100,00	11,52
30	32,08	37,08	41,25	82,08	100,00	100,00	10,31
35	25,26	28,87	30,93	68,56	100,00	100,00	12,84
40	29,74	35,38	41,54	93,85	100,00	100,00	8,97
45	7,26	7,26	8,06	50,00	100,00	100,00	17,23
50	9,17	10,00	13,33	80,00	100,00	100,00	13,23
55	9,06	10,27	12,69	63,44	100,00	100,00	15,25
60	11,90	14,08	16,84	60,81	100,00	100,00	15,19
65	3,13	3,13	4,17	38,54	100,00	100,00	19,01
70	10,00	10,00	10,00	60,00	100,00	100,00	15,80
75	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00	12,00
90	6,64	7,75	8,98	47,48	100,00	100,00	17,48
105	2,69	3,46	5,00	40,77	100,00	100,00	18,69
120	8,54	9,76	9,76	47,56	100,00	100,00	17,34
150	11,11	16,67	19,44	22,22	100,00	100,00	19,63
180	31,25	50,00	50,00	100,00	100,00	100,00	7,38
210	8,61	11,00	12,92	49,28	100,00	100,00	16,93

Fortsetzung V10							
Zeit [min]	Siebdurchgang [Gew.-%]						d_{mG} [mm]
	3 mm	5 mm	8 mm	16 mm	32 mm	64 mm	
240	6,21	7,24	8,62	47,59	100,00	100,00	17,51
270	7,89	13,16	15,79	71,05	100,00	100,00	14,12
330	7,41	14,81	14,81	100,00	100,00	100,00	10,67

V11							
Zeit [min]	Siebdurchgang [Gew.-%]						d_{mG} [mm]
	3 mm	5 mm	8 mm	16 mm	32 mm	64 mm	
5	82,35	88,24	100,00	100,00	100,00	100,00	2,56
10	11,65	14,36	18,70	63,69	100,00	100,00	14,73
15	13,42	16,55	21,73	68,89	100,00	100,00	13,85
20	8,76	11,21	15,44	64,12	100,00	100,00	15,00
25	9,97	12,43	16,15	67,35	92,84	100,00	16,23
30	1,88	2,36	4,59	55,01	100,00	100,00	17,05
35	0,57	0,72	3,01	40,54	90,69	100,00	21,17
40	1,41	1,85	4,79	57,78	100,00	100,00	16,73
45	0,68	0,97	4,17	46,65	88,46	100,00	20,90
50	5,17	6,46	10,93	45,95	86,02	100,00	20,97
55	8,28	11,53	20,62	74,19	100,00	100,00	13,50
60	4,81	6,14	10,41	54,61	100,00	100,00	16,62
65	8,20	9,84	17,21	72,95	100,00	100,00	13,89
70	15,48	18,71	29,03	60,00	100,00	100,00	14,41
75	17,12	22,11	31,24	75,75	100,00	100,00	12,28
80	4,76	6,35	11,11	61,22	100,00	100,00	15,78
85	8,91	13,37	26,24	91,58	100,00	100,00	11,05
90	1,48	3,45	7,88	57,64	100,00	100,00	16,53
105	2,73	4,37	10,38	47,18	100,00	100,00	17,60
120	2,97	6,26	15,02	83,41	100,00	100,00	12,95
150	17,55	24,15	33,82	82,77	100,00	100,00	11,25
210	19,67	26,23	34,97	100,00	100,00	100,00	9,03
270	22,17	31,03	41,38	85,22	100,00	100,00	10,27
330	22,76	30,89	38,21	75,61	100,00	100,00	11,59
390	40,54	54,05	64,86	100,00	100,00	100,00	6,27

V12							
Zeit [min]	Siebdurchgang [Gew.-%]						d_{mG} [mm]
	3 mm	5 mm	8 mm	16 mm	32 mm	64 mm	
5	32,98	39,30	43,51	78,60	100,00	100,00	10,53
10	20,00	24,59	29,84	73,44	100,00	100,00	12,53
15	21,08	25,24	29,68	77,81	100,00	100,00	11,98
20	57,69	66,67	73,08	100,00	100,00	100,00	5,16
25	27,08	32,81	38,54	77,34	100,00	100,00	11,24
30	30,85	39,36	43,62	91,49	100,00	100,00	9,02
35	18,70	21,14	22,76	60,16	100,00	100,00	14,63
40	14,46	16,57	19,88	77,11	100,00	100,00	12,95
45	22,90	26,72	32,82	92,37	100,00	100,00	9,98
50	43,80	51,82	56,20	87,59	100,00	100,00	8,23
55	37,50	37,50	37,50	100,00	100,00	100,00	8,25
60	31,03	34,48	34,48	82,76	100,00	100,00	10,69
120	25,29	28,74	29,89	87,36	100,00	100,00	10,65

V13 Zeit [min]	Siebdurchgang [Gew.-%]						d _{mG} [mm]
	3 mm	5 mm	8 mm	16 mm	32 mm	64 mm	
5	52,94	60,29	61,76	77,94	100,00	100,00	8,66
10	52,38	60,71	64,29	86,90	100,00	100,00	7,45
15	50,00	57,02	63,16	89,47	100,00	100,00	7,36
20	26,19	30,36	33,93	76,79	100,00	100,00	11,64
25	42,16	48,53	52,94	97,06	100,00	100,00	7,38
30	74,00	82,00	88,00	100,00	100,00	100,00	3,60
35	63,64	72,73	75,00	84,09	100,00	100,00	6,66
40	42,62	47,54	47,54	65,57	100,00	100,00	11,48
45	48,15	54,32	65,43	87,65	100,00	100,00	7,54
50	47,14	54,29	58,57	87,14	100,00	100,00	8,02
55	77,78	88,89	88,89	100,00	100,00	100,00	3,33
60	26,40	31,20	36,00	78,40	100,00	100,00	11,29
65	39,42	47,12	53,85	93,27	100,00	100,00	7,87
70	5,66	6,60	7,55	51,89	100,00	100,00	17,07
75	16,22	18,92	27,03	100,00	100,00	100,00	9,72
90	22,37	26,97	32,89	88,16	100,00	100,00	10,48
120	17,54	20,18	23,68	75,88	100,00	100,00	12,73
180	25,00	29,58	35,00	84,58	100,00	100,00	10,68
240	28,75	32,50	36,25	100,00	100,00	100,00	8,62

V14 Zeit [min]	Siebdurchgang [Gew.-%]						d _{mG} [mm]
	3 mm	5 mm	8 mm	16 mm	32 mm	64 mm	
5	52,50	60,00	60,00	75,00	100,00	100,00	9,15
10	29,41	35,29	45,10	86,27	100,00	100,00	9,70
15	36,96	46,74	54,35	100,00	100,00	100,00	7,10
20	46,67	56,67	63,33	100,00	100,00	100,00	6,17
25	17,00	21,67	28,82	79,31	100,00	100,00	12,02
30	17,85	22,12	26,91	64,55	100,00	100,00	13,86
35	31,28	37,43	40,22	72,07	100,00	100,00	11,57
40	37,50	43,75	50,00	77,08	100,00	100,00	10,16
45	35,29	41,18	45,10	70,59	100,00	100,00	11,31
50	13,47	16,91	20,63	58,74	100,00	100,00	15,12
55	31,93	39,08	48,74	82,77	100,00	100,00	9,77
60	8,32	10,30	12,87	43,96	86,14	100,00	20,92
65	4,59	6,42	16,51	85,32	100,00	100,00	12,60
70	3,14	4,93	9,42	67,26	100,00	100,00	15,22
75	1,35	3,15	7,66	54,50	100,00	100,00	16,93
80	14,41	18,80	25,73	63,64	89,98	100,00	16,59
85	13,20	16,24	26,40	91,88	100,00	100,00	10,85
90	7,21	9,91	15,06	54,18	81,08	100,00	20,82
95	16,61	21,66	28,16	76,17	100,00	100,00	12,43
100	15,00	17,50	32,50	67,50	100,00	100,00	13,38
105	14,00	16,00	28,00	64,00	100,00	100,00	14,10
120	7,55	9,43	13,21	45,28	100,00	100,00	17,45
150	28,85	34,62	48,08	100,00	100,00	100,00	7,91
210	16,67	20,83	29,17	100,00	100,00	100,00	9,54
270	4,67	8,41	19,63	100,00	100,00	100,00	10,62
330	18,67	30,67	30,67	80,00	100,00	100,00	11,57
390	26,92	34,62	46,15	69,23	100,00	100,00	11,75
450	24,24	30,30	42,42	81,82	100,00	100,00	10,61
510	24,24	33,33	39,39	87,88	100,00	100,00	9,97
570	23,81	28,57	47,62	100,00	100,00	100,00	8,19

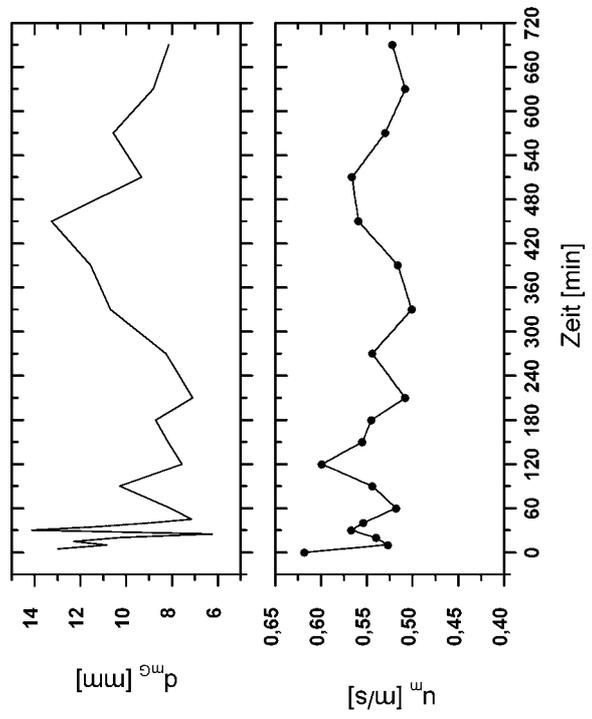
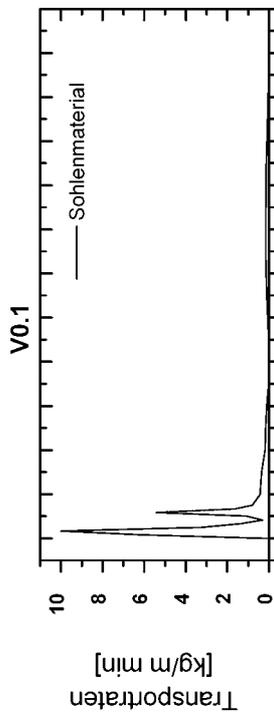
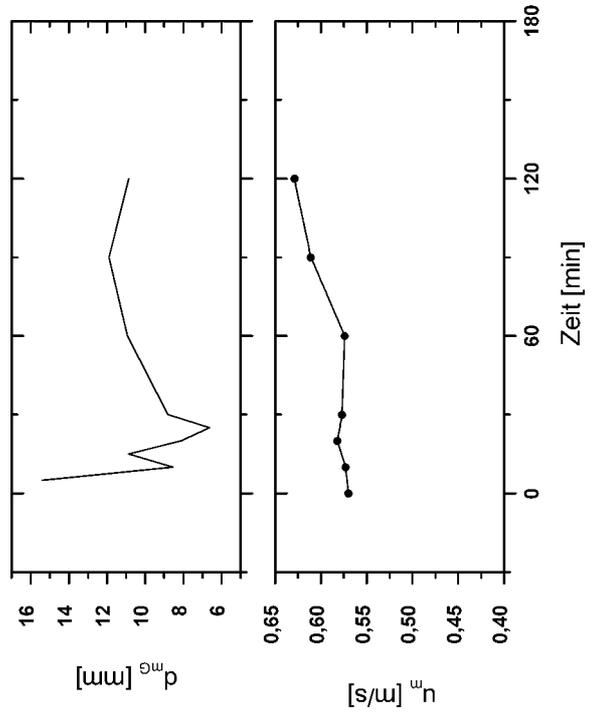
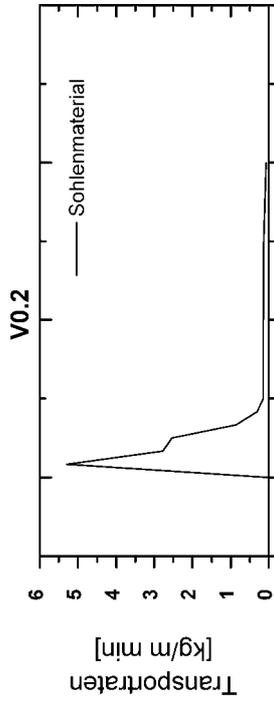
V15 Zeit [min]	Siebdurchgang [Gew.-%]						d _{mG} [mm]
	3 mm	5 mm	8 mm	16 mm	32 mm	64 mm	
5	17,81	21,79	26,64	72,58	100,00	100,00	12,92
10	12,10	17,09	24,53	75,36	98,94	100,00	13,19
15	23,57	30,17	37,93	81,50	99,40	100,00	11,05
20	19,97	26,97	35,86	85,36	100,00	100,00	10,71
25	17,25	23,73	32,73	85,38	100,00	100,00	11,01
30	25,29	33,66	41,87	83,75	100,00	100,00	10,30
35	22,17	29,32	37,63	79,25	98,72	100,00	11,55
40	40,45	47,96	54,66	88,34	98,49	100,00	8,74
45	14,76	22,55	32,29	81,76	100,00	100,00	11,55
50	16,82	23,66	34,35	85,59	100,00	100,00	10,91
55	13,23	19,02	28,99	87,11	100,00	100,00	11,21
60	30,25	40,25	49,18	89,07	100,00	100,00	8,99
65	33,56	43,96	51,68	87,58	100,00	100,00	8,87
70	32,30	44,10	55,28	95,65	100,00	100,00	7,72
75	26,32	42,11	52,63	100,00	100,00	100,00	7,50
90	34,41	51,61	63,44	100,00	100,00	100,00	6,52
120	48,11	66,98	82,08	100,00	100,00	100,00	4,83
150	41,77	59,49	70,89	100,00	100,00	100,00	5,76
210	53,64	74,55	80,91	100,00	100,00	100,00	4,60
270	65,12	77,33	80,81	94,77	100,00	100,00	4,94
330	40,98	54,10	63,93	100,00	100,00	100,00	6,30
390	66,20	80,99	86,62	100,00	100,00	100,00	3,88
450	57,97	68,12	69,57	100,00	100,00	100,00	5,29

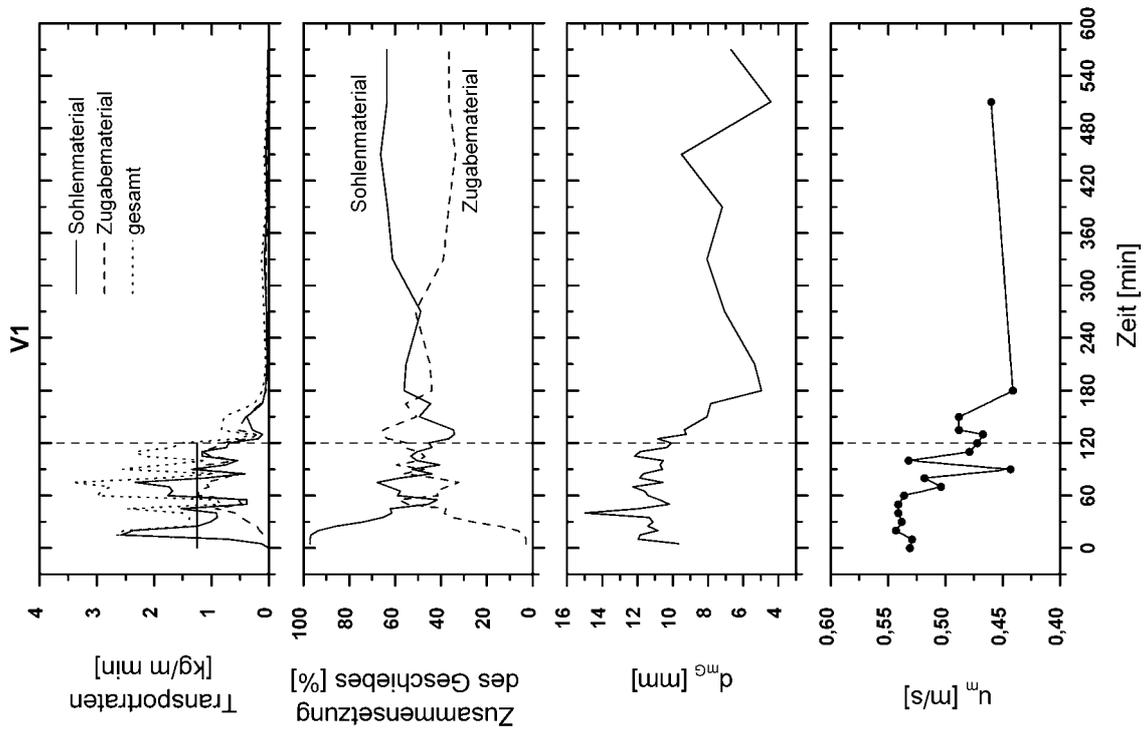
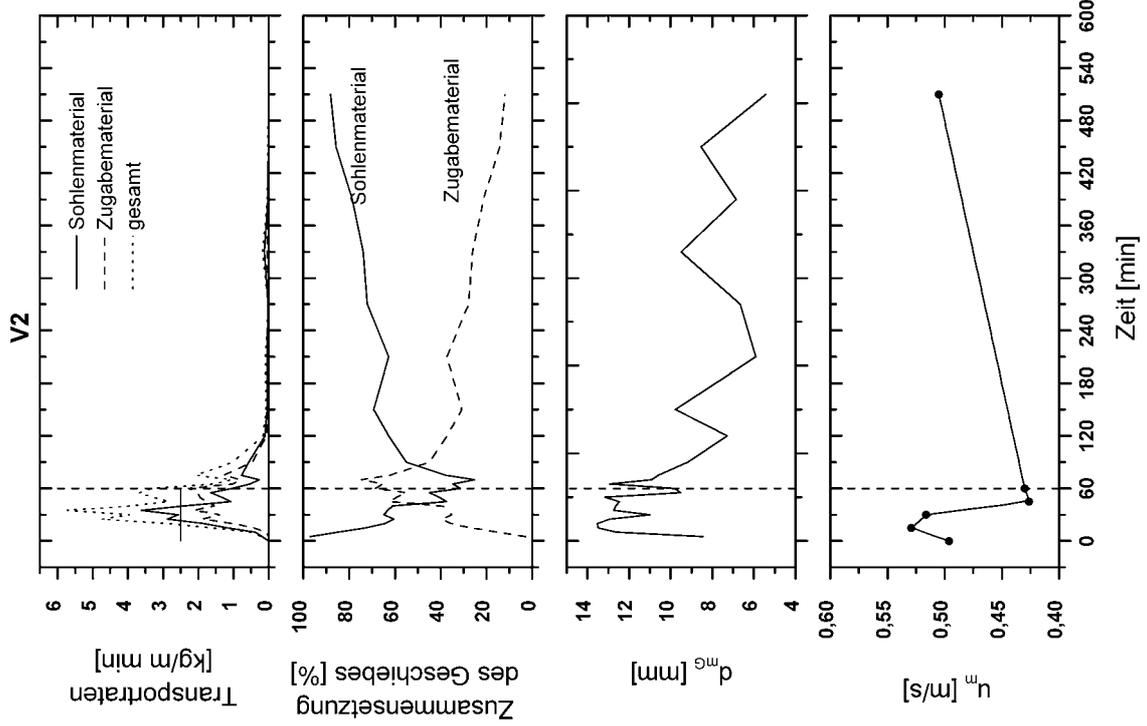
V16 Zeit [min]	Siebdurchgang [Gew.-%]						d _{mG} [mm]
	3 mm	5 mm	8 mm	16 mm	32 mm	64 mm	
5	16,54	20,62	27,26	73,24	100,00	100,00	12,86
10	9,37	12,80	20,00	74,17	99,64	100,00	13,58
15	17,33	23,62	32,10	79,92	100,00	100,00	11,71
20	23,42	30,99	40,05	84,65	99,54	100,00	10,50
25	34,47	41,91	49,38	86,82	99,36	100,00	9,28
30	24,01	29,46	37,82	85,29	100,00	100,00	10,47
35	14,81	21,35	29,75	77,62	97,54	100,00	12,81
40	31,86	38,25	44,88	83,82	100,00	100,00	9,88
45	5,60	11,10	20,62	85,34	100,00	100,00	12,23
50	26,12	33,99	41,76	86,08	100,00	100,00	10,00
55	17,07	25,00	34,29	81,85	100,00	100,00	11,32
60	11,92	18,28	26,32	76,93	100,00	100,00	12,62
65	34,22	43,61	52,02	85,31	94,34	100,00	10,48
70	40,41	50,97	57,95	87,38	100,00	100,00	8,24
75	51,14	61,38	67,40	94,31	100,00	100,00	6,42
80	56,72	68,70	76,28	100,00	100,00	100,00	4,95
85	55,71	67,12	74,89	100,00	100,00	100,00	5,08
90	63,83	76,60	82,27	100,00	100,00	100,00	4,27
120	67,00	78,06	83,40	100,00	100,00	100,00	4,12
150	65,40	78,33	86,69	100,00	100,00	100,00	3,96
210	55,52	66,57	73,83	97,01	100,00	100,00	5,52
270	64,92	75,92	81,15	100,00	100,00	100,00	4,34
330	73,96	82,25	90,53	100,00	100,00	100,00	3,48
390	47,06	57,35	64,71	100,00	100,00	100,00	6,07
450	68,35	82,28	91,14	100,00	100,00	100,00	3,54

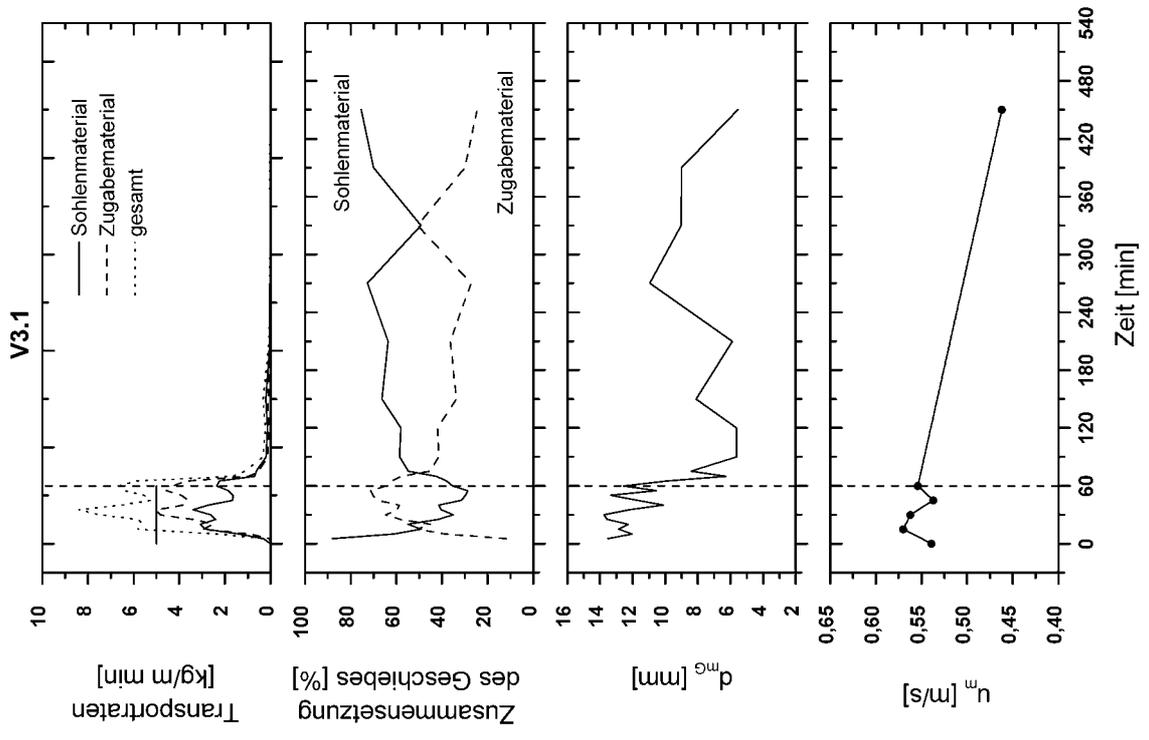
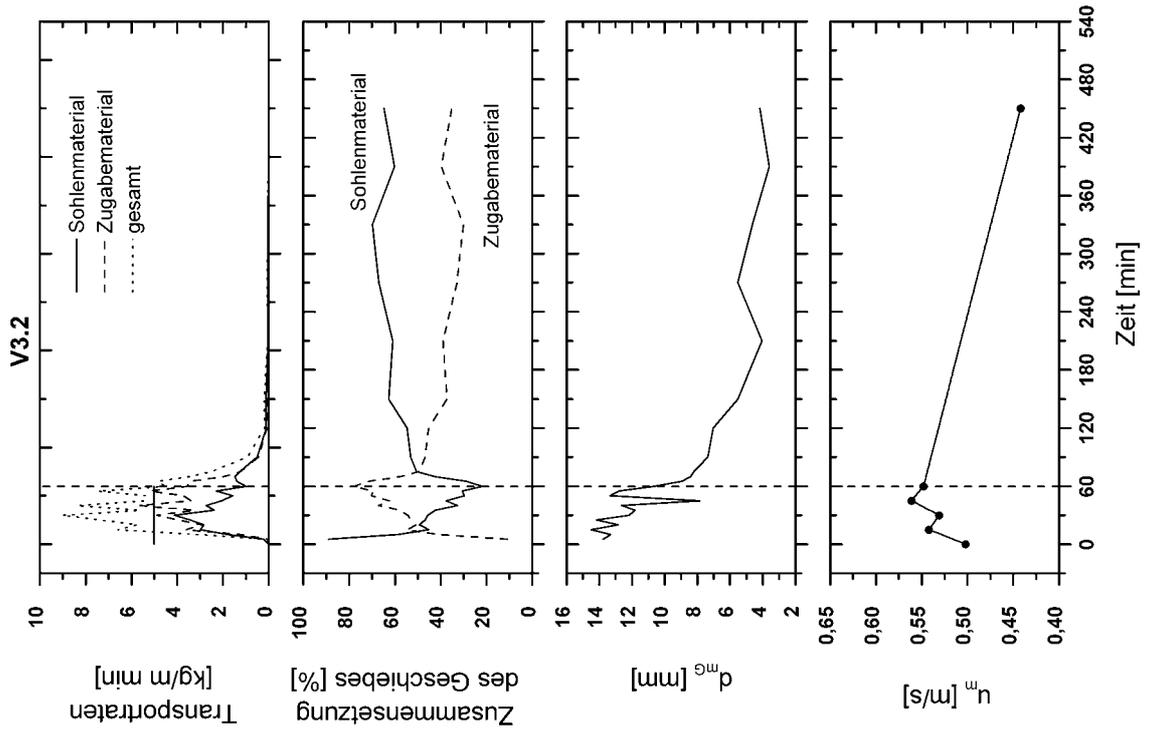
V17 Zeit [min]	Siebdurchgang [Gew.-%]						d _{mG} [mm]
	3 mm	5 mm	8 mm	16 mm	32 mm	64 mm	
5	11,36	14,31	54,76	89,33	100,00	100,00	9,68
10	6,03	9,38	16,07	73,95	97,78	100,00	14,42
15	10,62	14,26	21,50	74,83	98,99	100,00	13,51
20	14,97	21,93	31,21	79,86	97,67	100,00	12,41
25	26,32	33,64	41,59	81,85	100,00	100,00	10,52
30	17,49	23,19	31,28	85,31	96,94	100,00	11,84
35	20,99	27,75	35,49	78,97	98,59	100,00	11,79
40	14,71	20,36	28,35	82,66	100,00	100,00	11,72
45	21,19	28,68	36,27	81,09	98,26	100,00	11,55
50	22,22	29,67	38,83	83,39	100,00	100,00	10,67
55	24,95	31,38	37,73	73,32	98,42	100,00	12,22
60	33,85	39,57	49,96	88,31	100,00	100,00	8,98
65	30,41	38,20	45,86	82,85	100,00	100,00	9,97
70	56,69	68,66	75,53	95,07	100,00	100,00	5,58
75	59,34	68,86	78,39	100,00	100,00	100,00	4,77
90	48,55	59,39	67,79	99,08	100,00	100,00	5,92
120	46,62	54,76	61,42	92,07	100,00	100,00	7,27
180	60,40	70,46	76,40	95,71	100,00	100,00	5,34
240	71,90	81,82	89,26	100,00	100,00	100,00	3,61

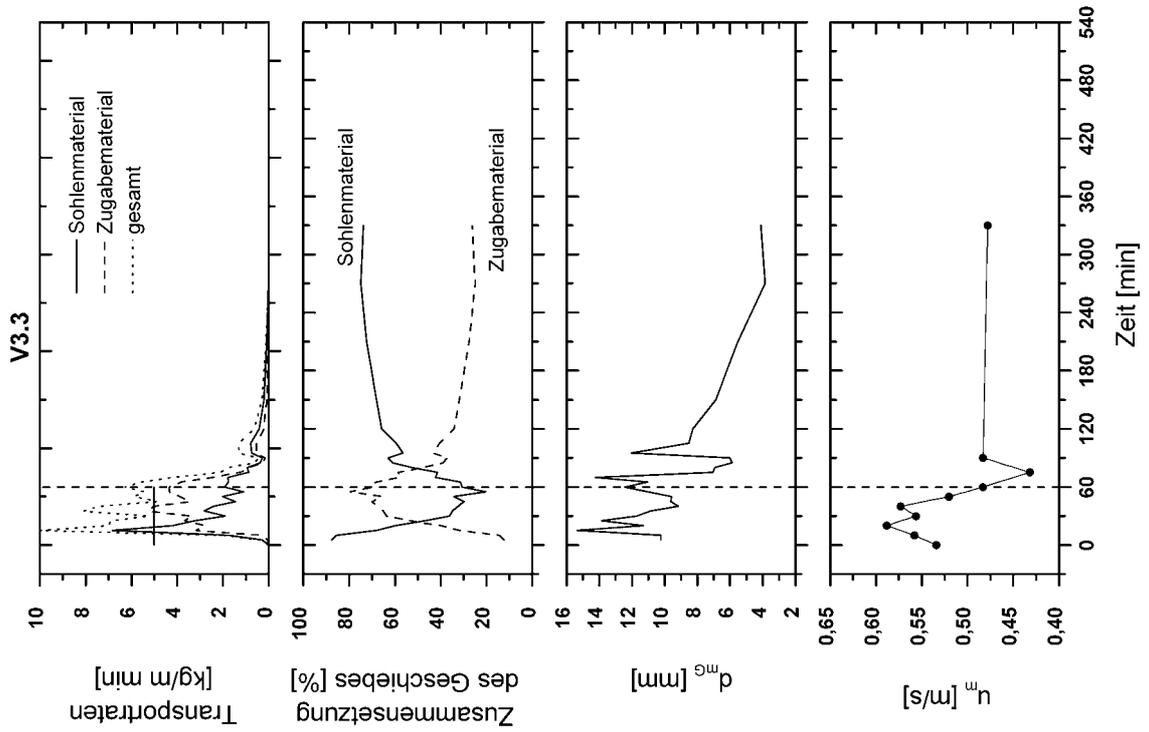
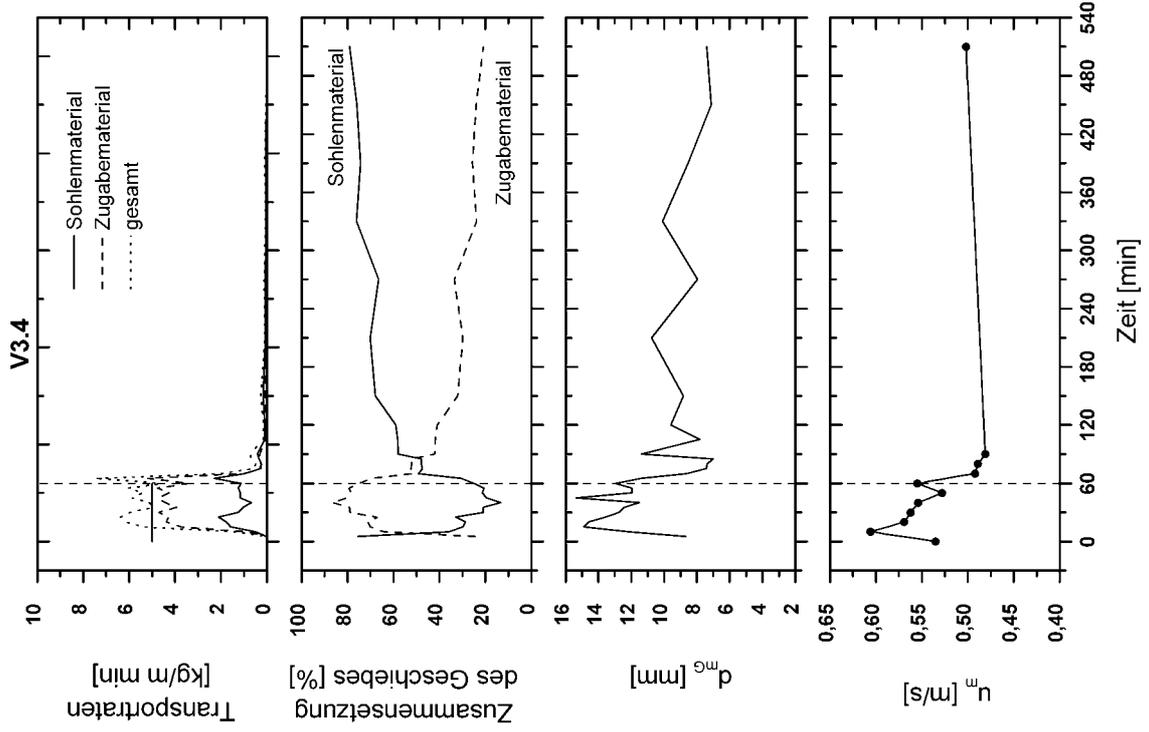
V18 Zeit [min]	Siebdurchgang [Gew.-%]						d _{mG} [mm]
	3 mm	5 mm	8 mm	16 mm	32 mm	64 mm	
5	15,75	19,44	25,63	70,17	100,00	100,00	13,37
10	5,58	7,20	10,62	58,30	97,74	100,00	16,67
15	11,98	16,15	23,74	71,25	98,99	100,00	13,74
20	3,18	5,36	11,96	73,64	100,00	100,00	14,31
25	13,41	18,07	25,93	70,70	93,64	100,00	14,90
30	20,52	25,90	33,89	79,27	98,48	100,00	11,93
35	10,41	13,38	17,80	61,08	95,52	100,00	16,22
40	15,35	18,42	23,03	71,05	100,00	100,00	13,44
45	11,42	13,88	18,28	56,57	94,85	100,00	16,86
50	18,61	23,24	30,25	70,31	94,19	100,00	14,34
55	10,43	13,23	18,22	60,69	91,26	100,00	17,27
60	9,39	12,06	18,10	65,62	96,90	100,00	15,38
65	2,35	4,47	10,59	46,12	47,76	100,00	30,26
70	25,00	50,00	75,00	100,00	100,00	100,00	6,13
75	14,29	28,57	28,57	100,00	100,00	100,00	9,43
90	6,74	10,93	18,37	57,91	77,91	100,00	20,93
120	23,24	29,66	38,23	83,18	100,00	100,00	10,71
180	35,31	44,59	55,04	83,55	100,00	100,00	9,12
240	37,94	45,70	53,17	80,39	100,00	100,00	9,52
300	44,81	53,86	63,71	93,17	100,00	100,00	7,07
360	34,46	41,25	48,83	85,90	100,00	100,00	9,28
420	48,08	55,77	61,54	88,46	100,00	100,00	7,63

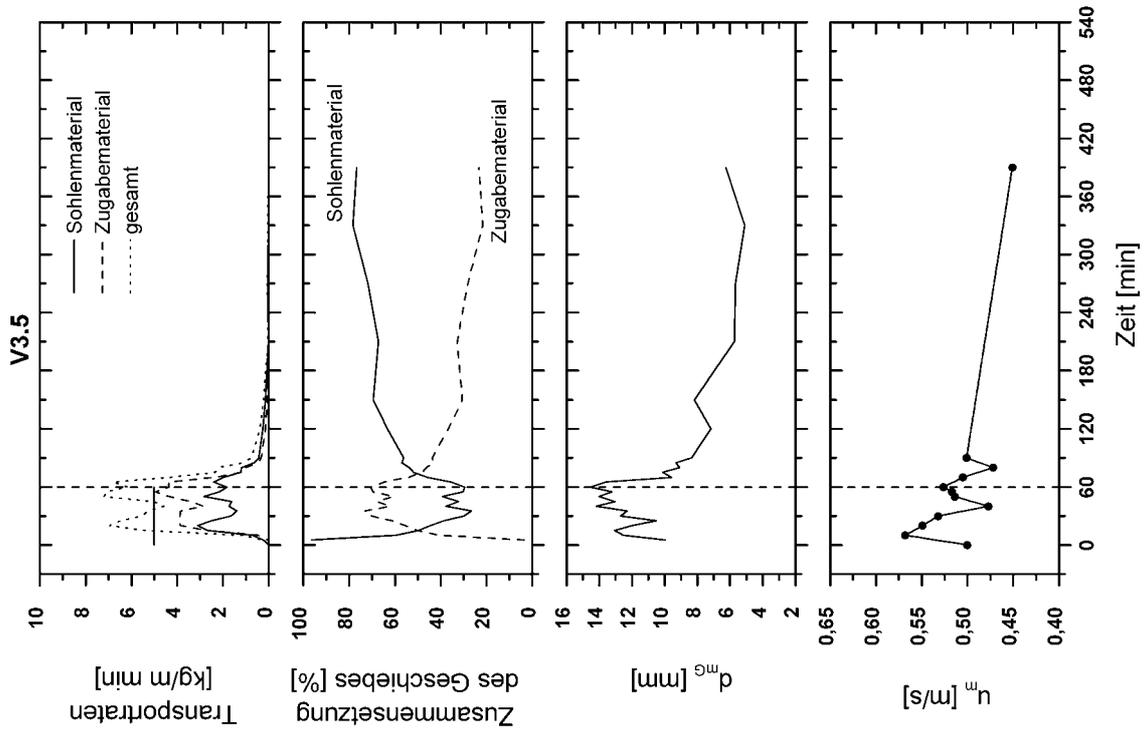
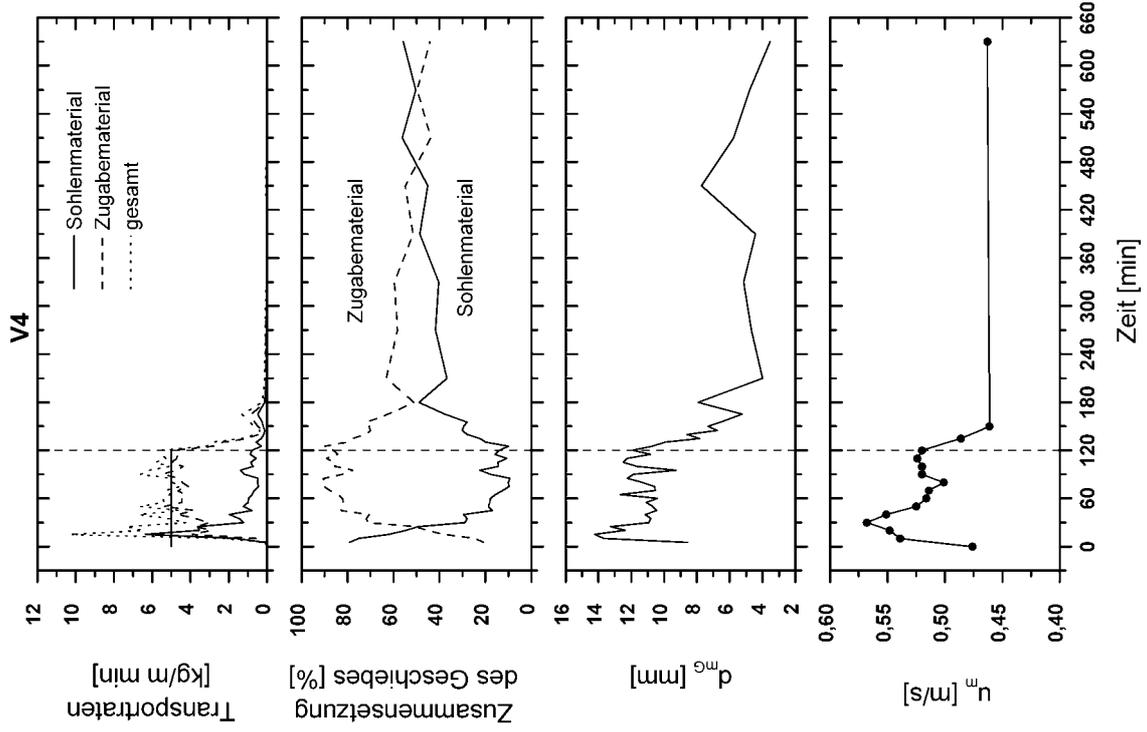
A.5 Darstellung der Transportraten, der Geschiebezusammensetzung, des mittleren Korndurchmessers und der mittleren Fließgeschwindigkeit

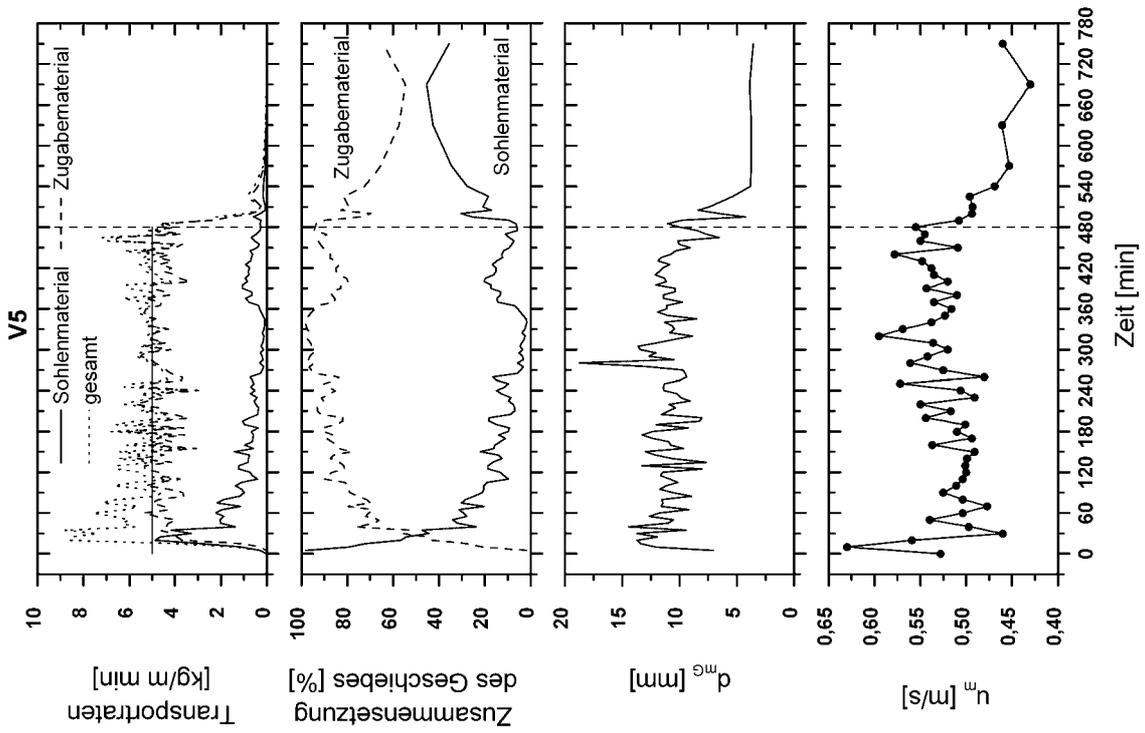
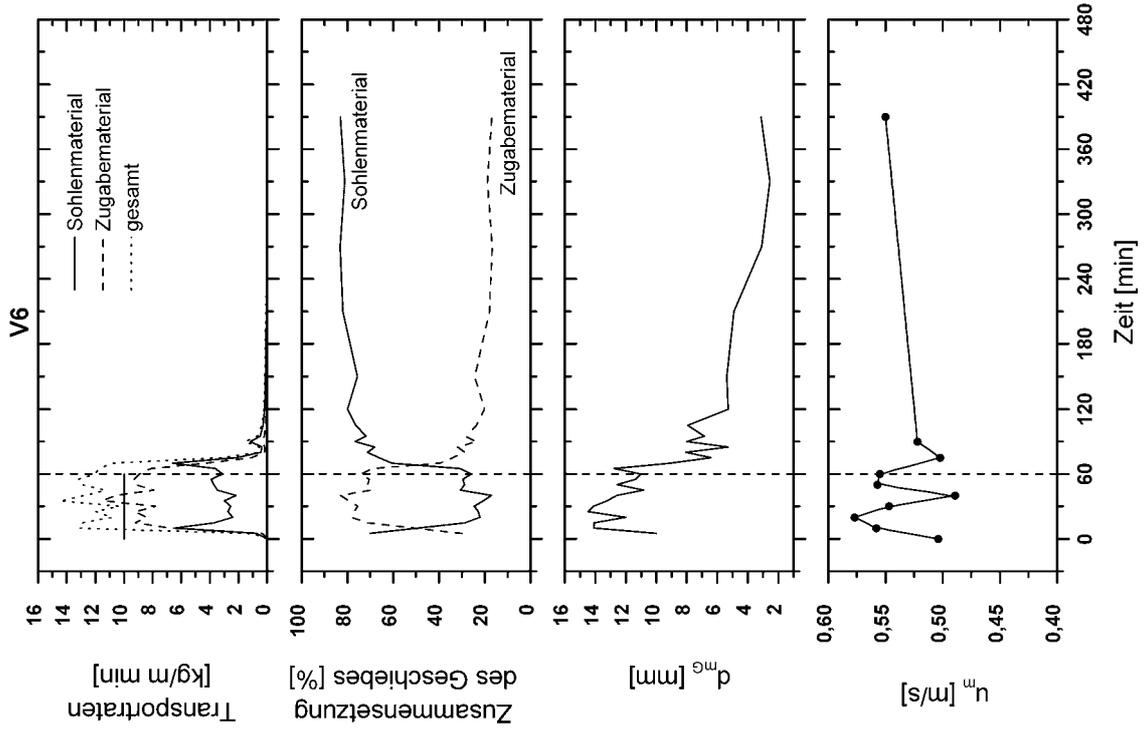


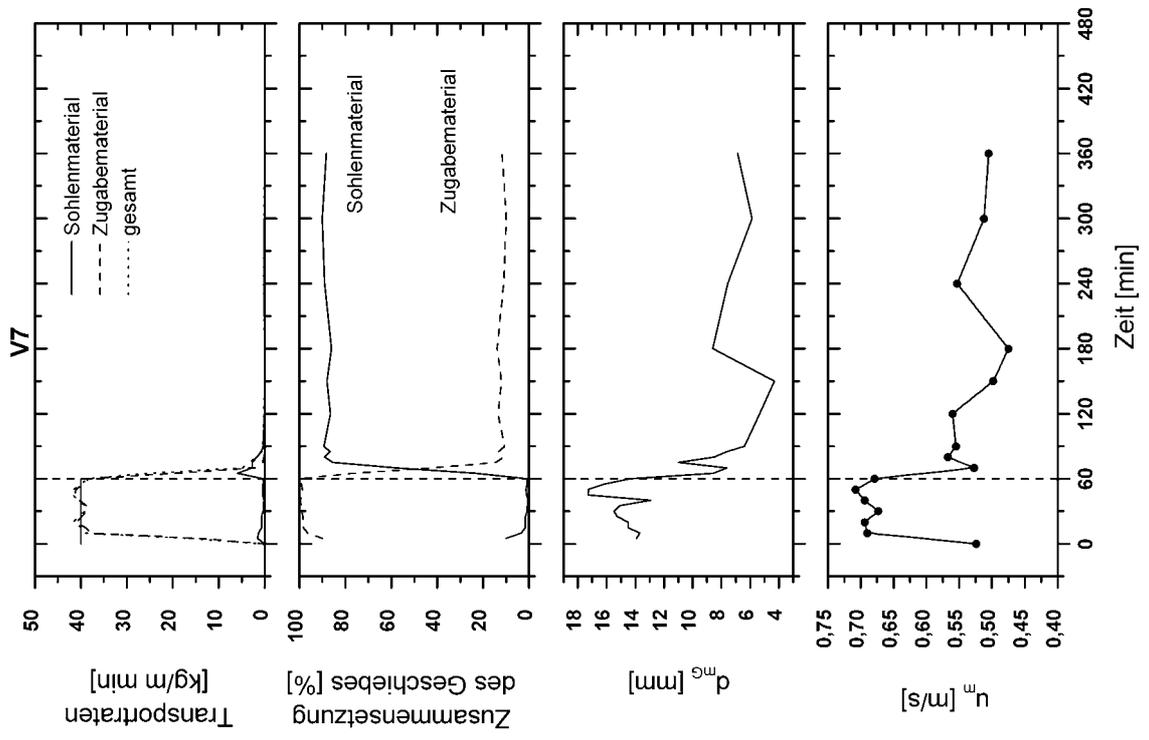
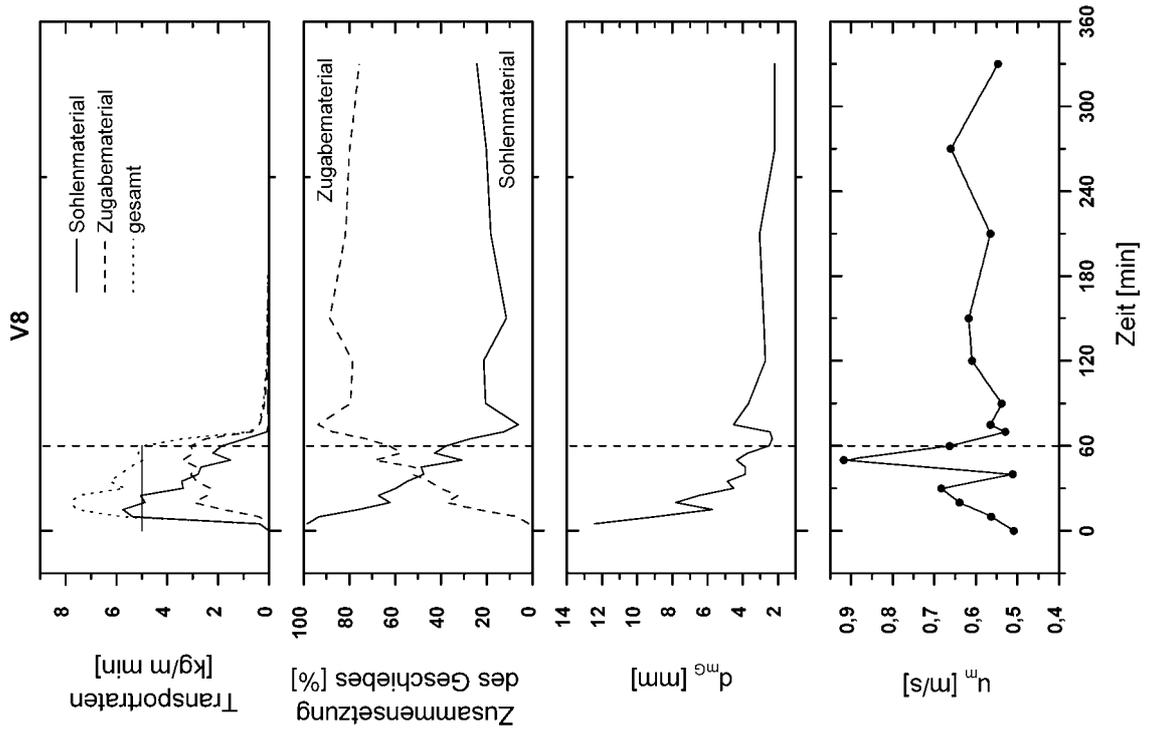


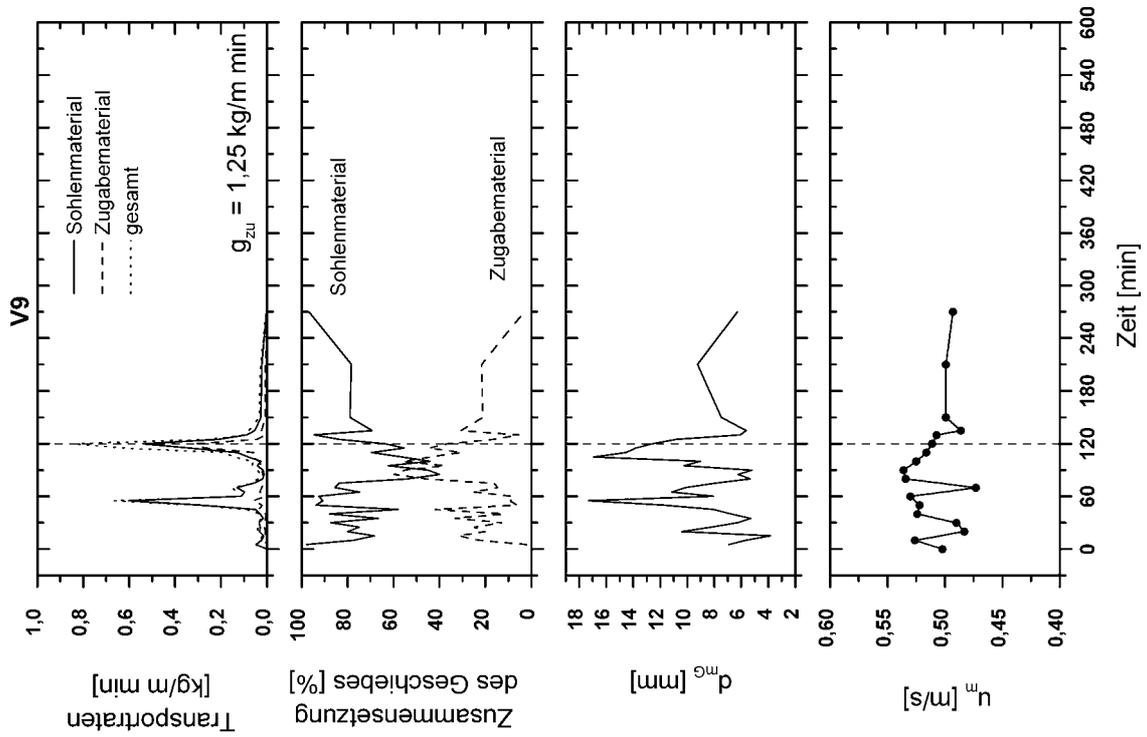
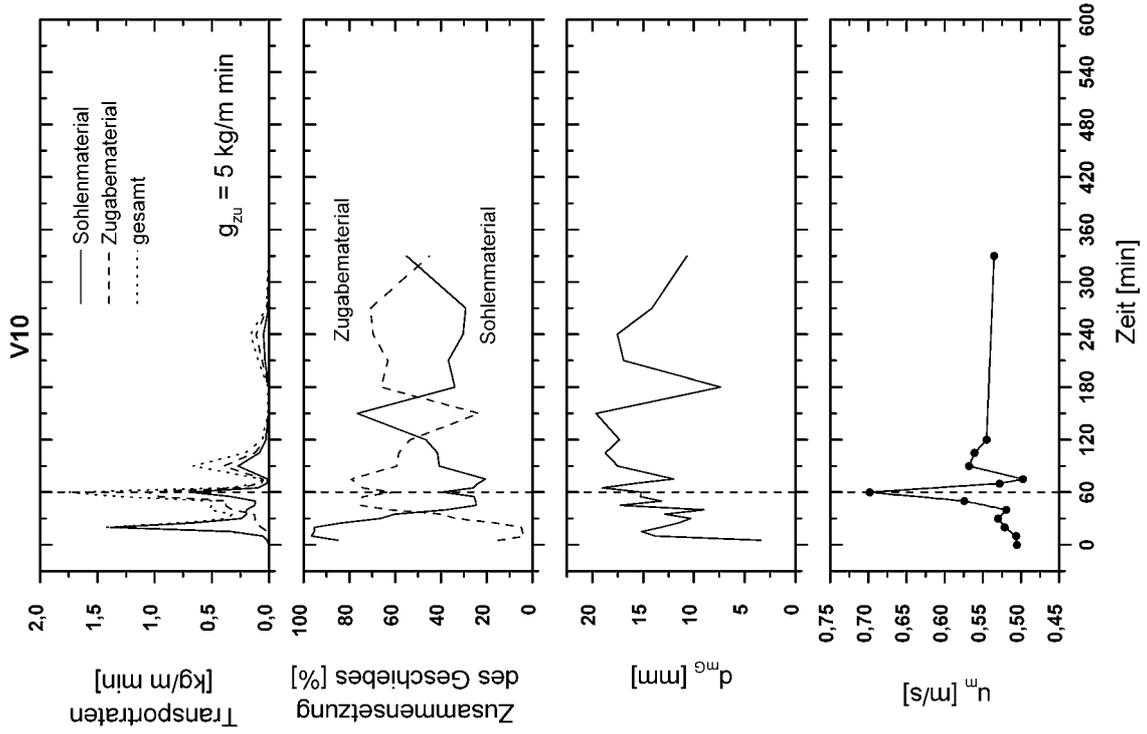


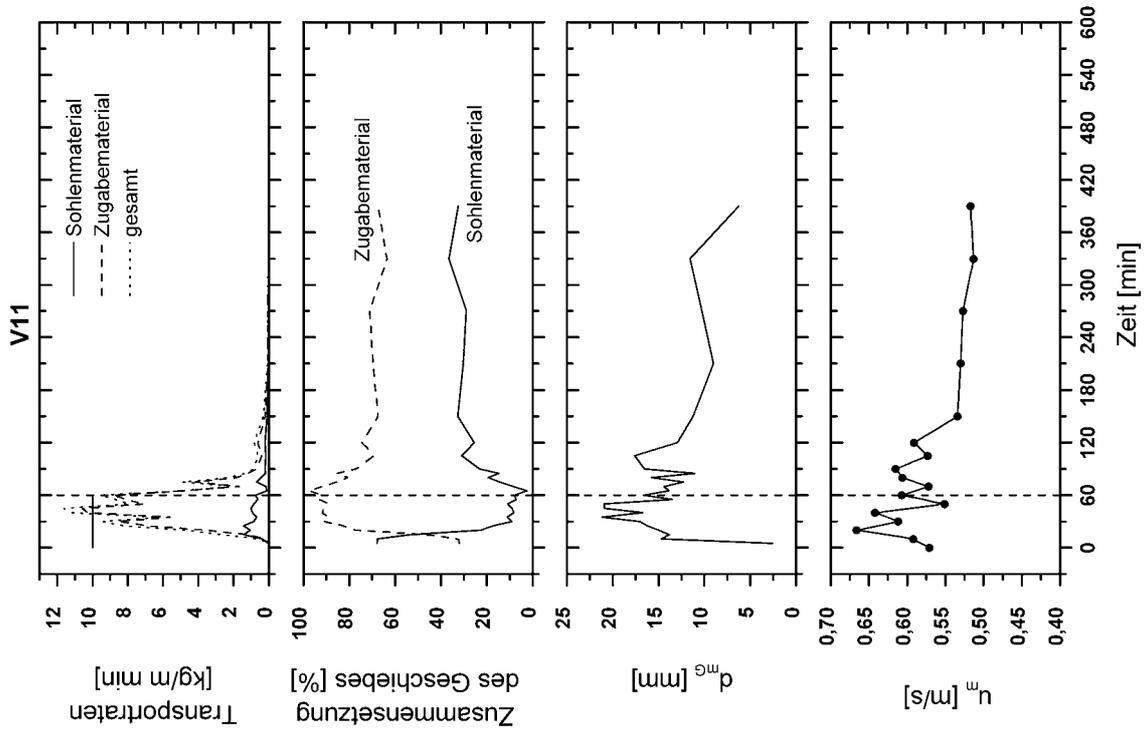
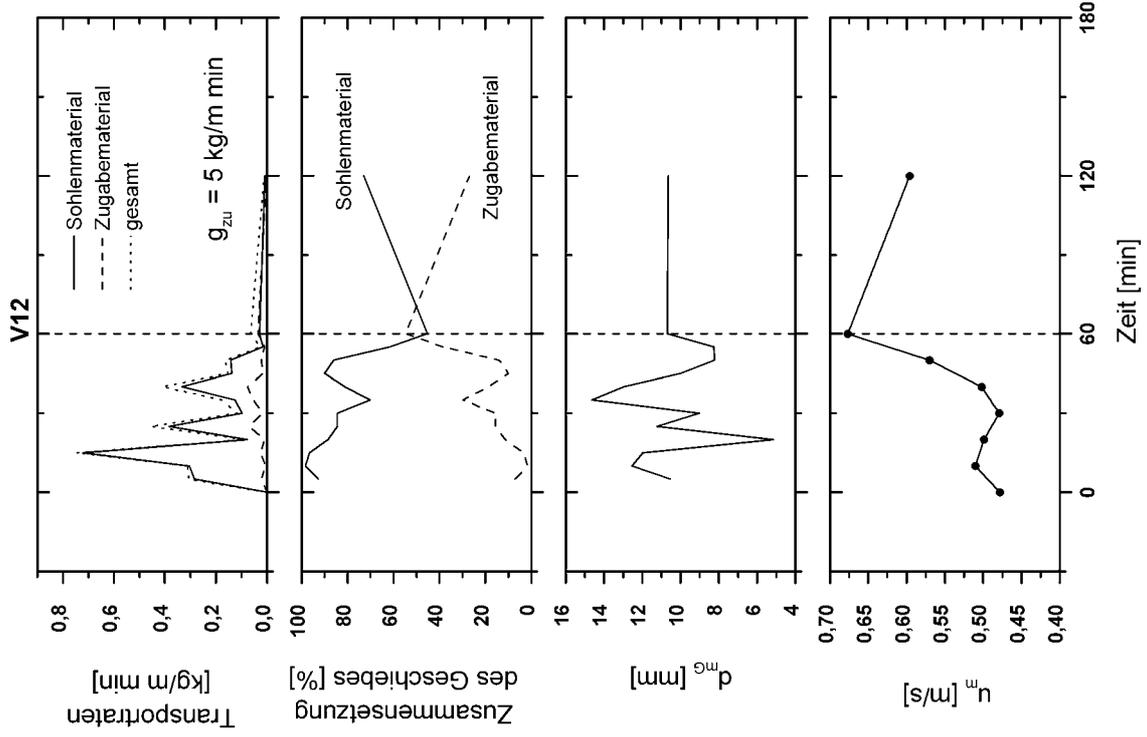


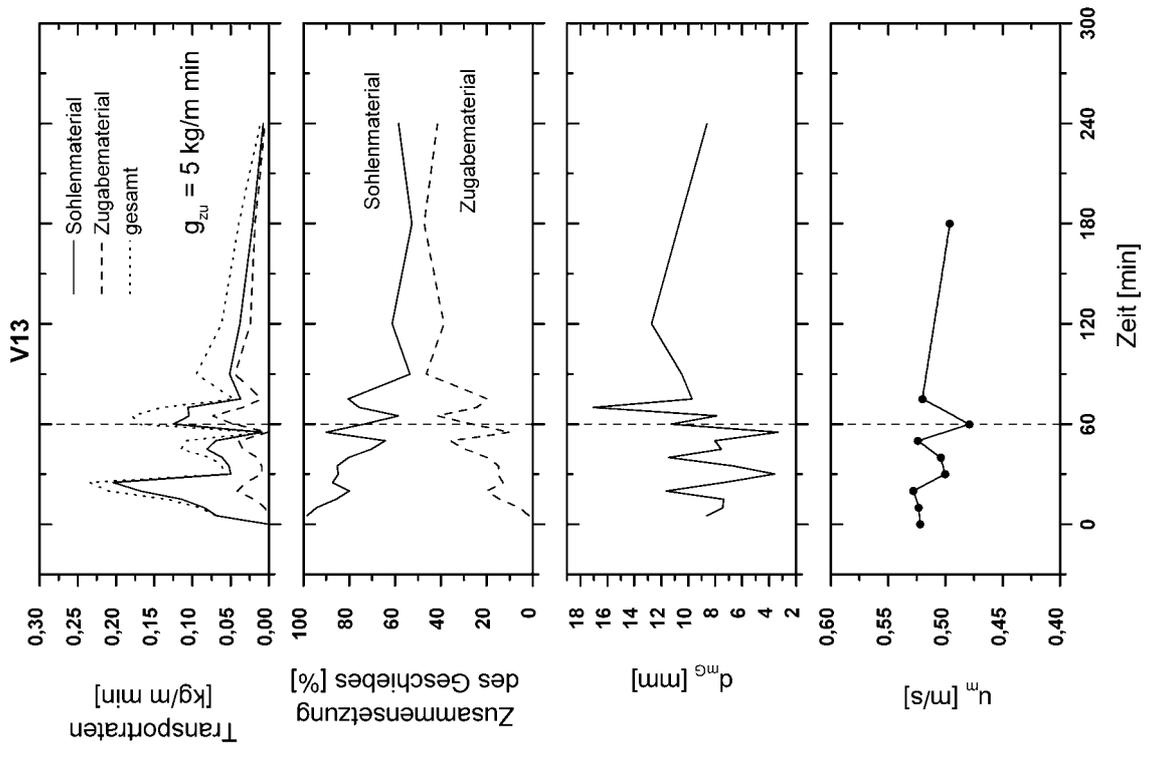
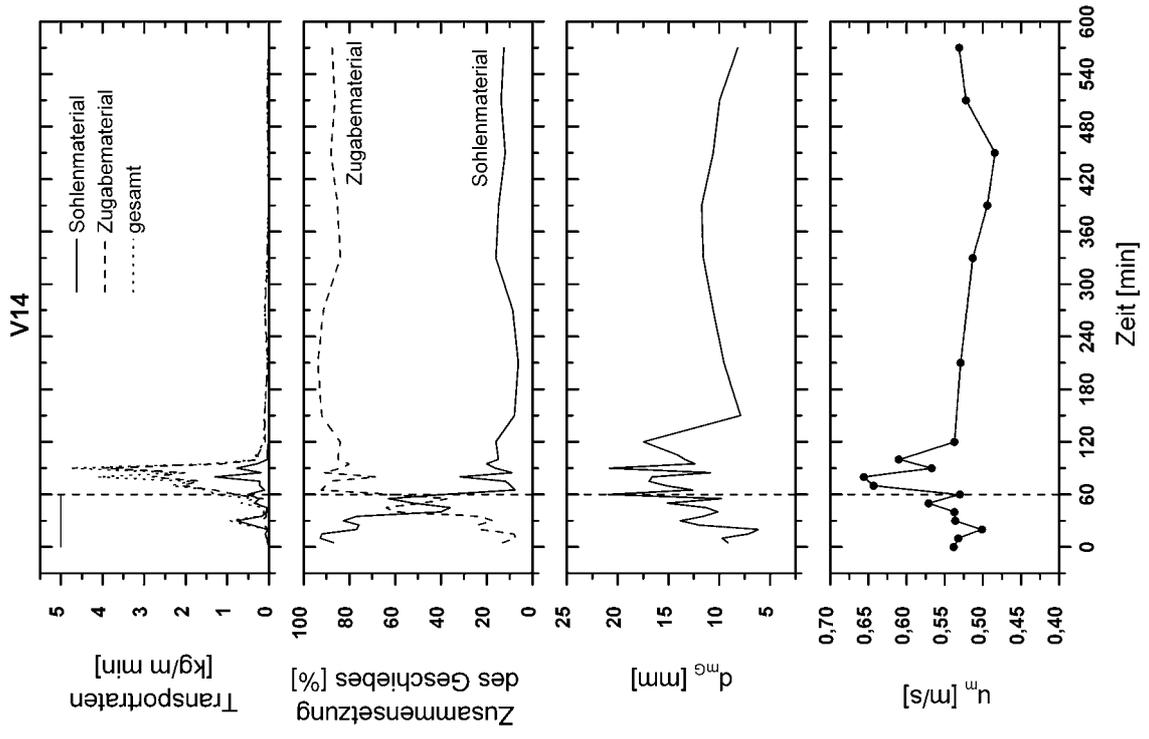


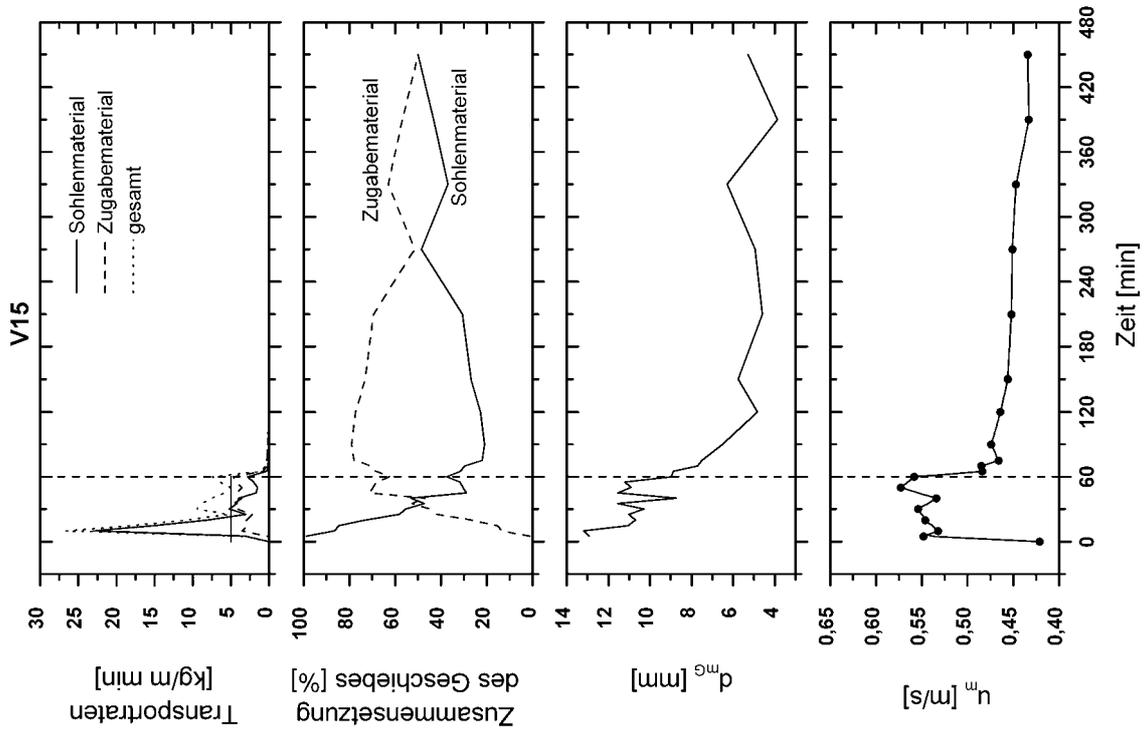
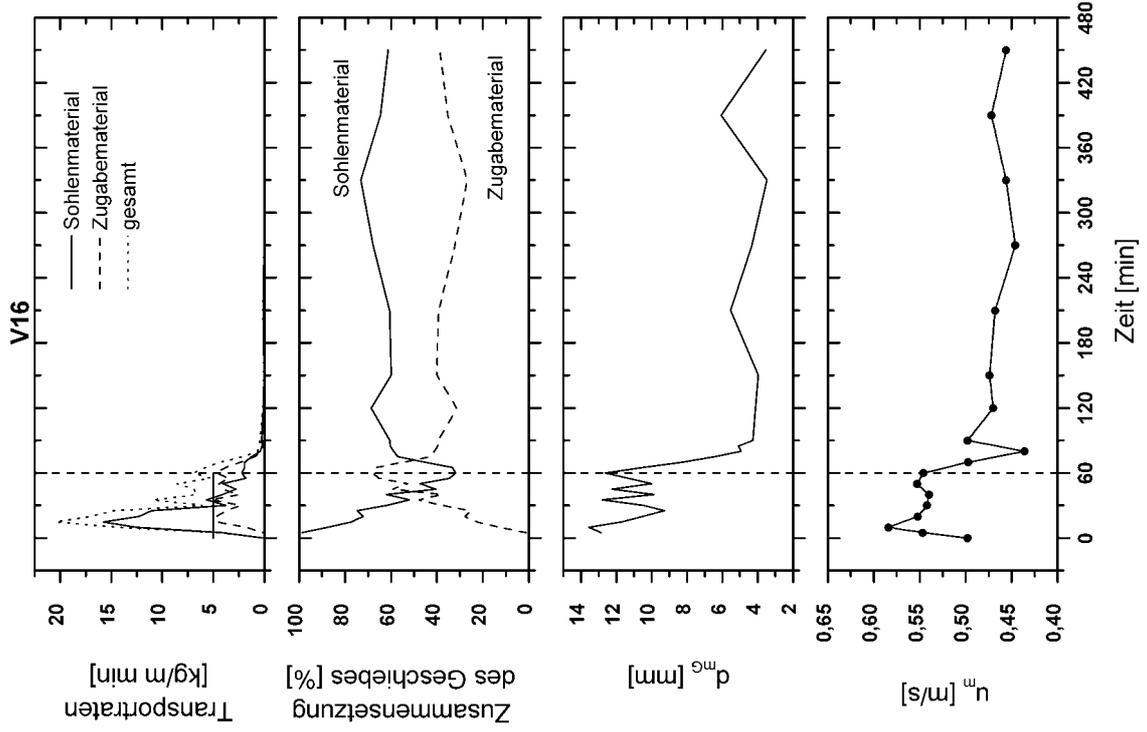


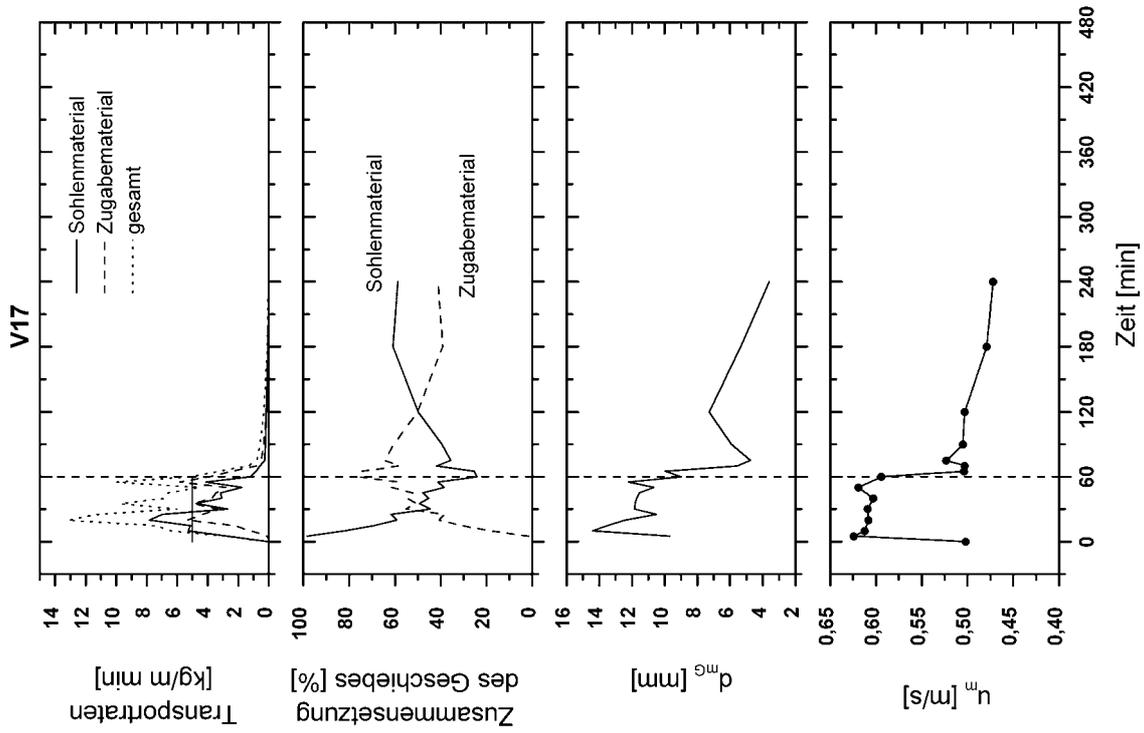
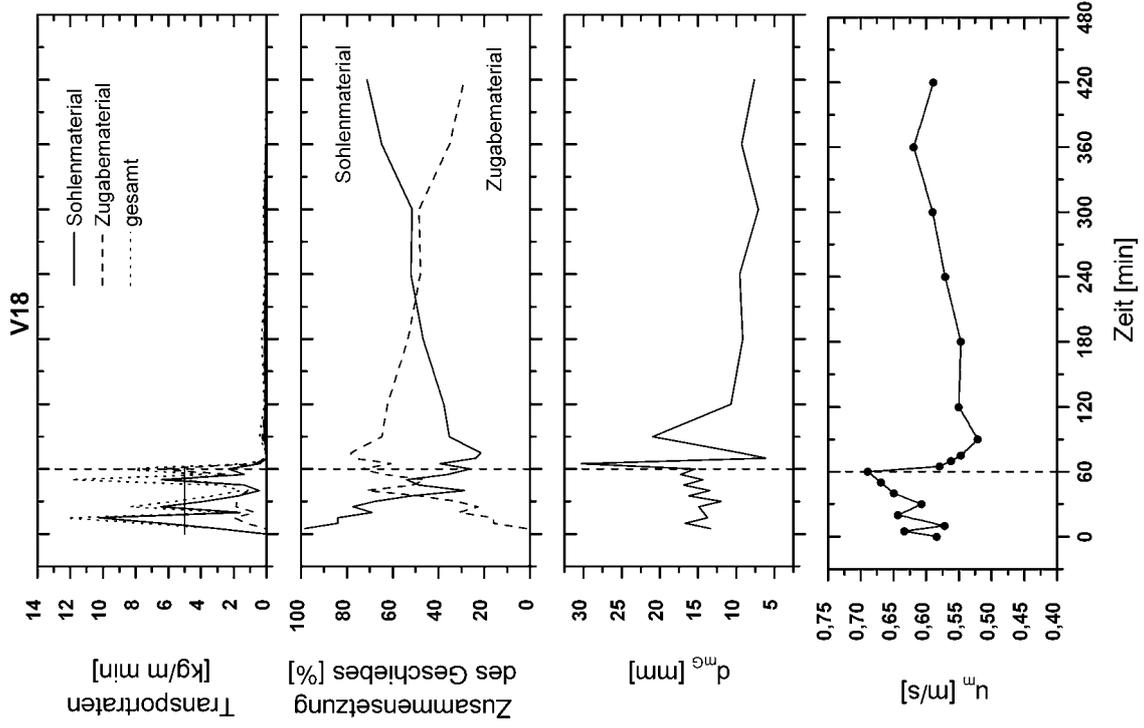




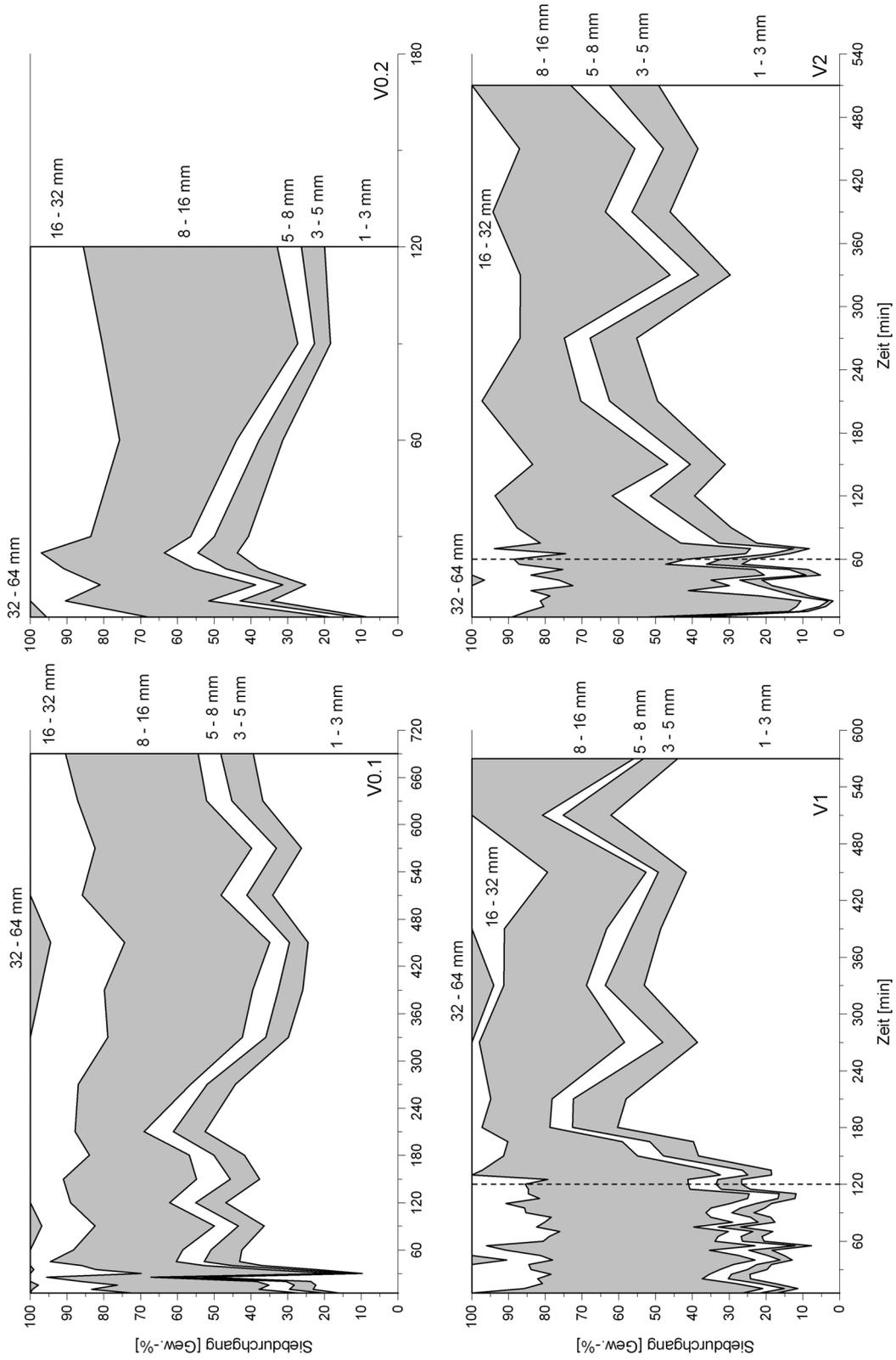


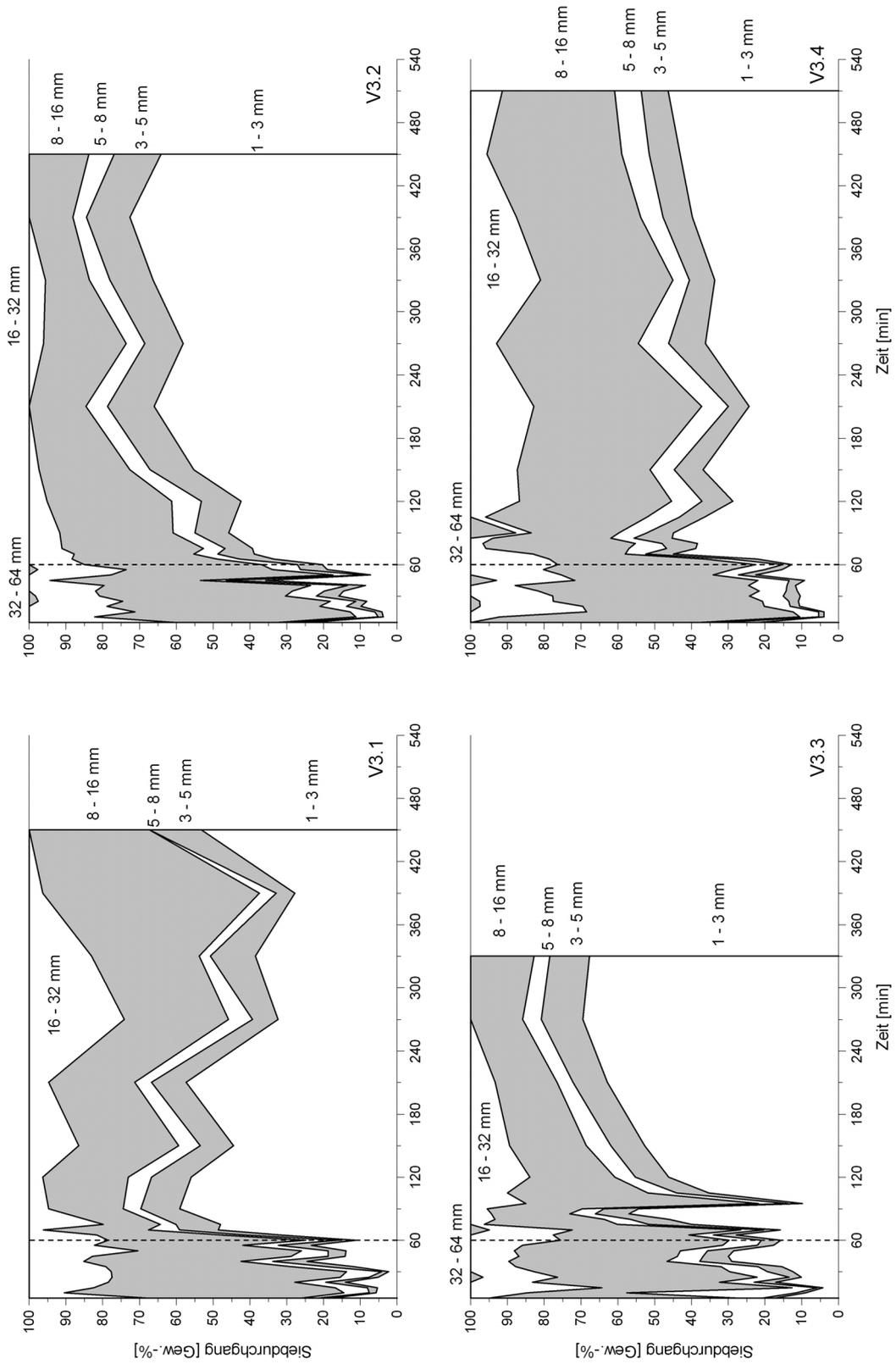


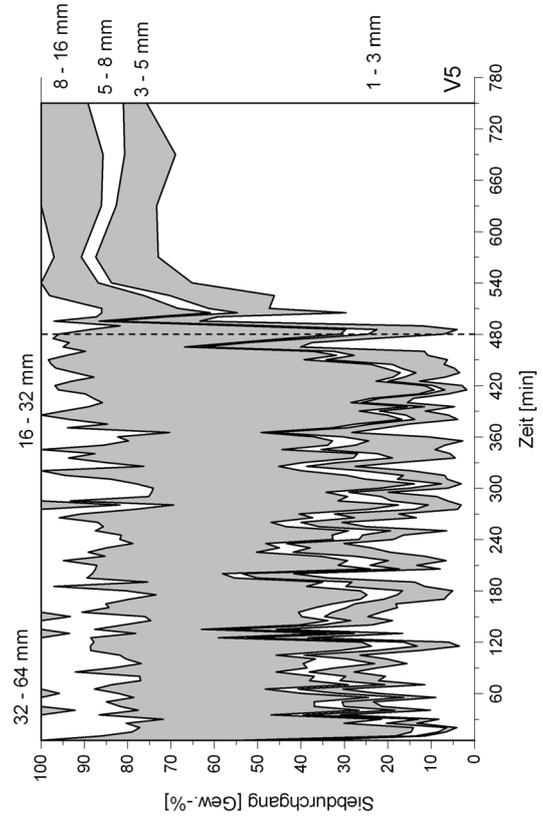
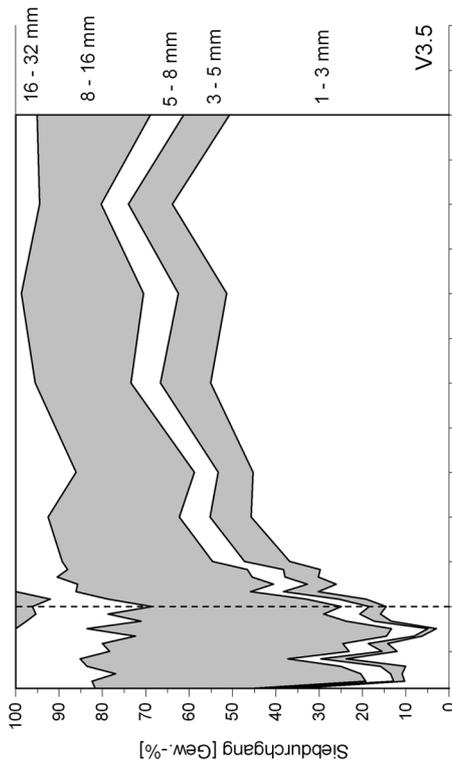
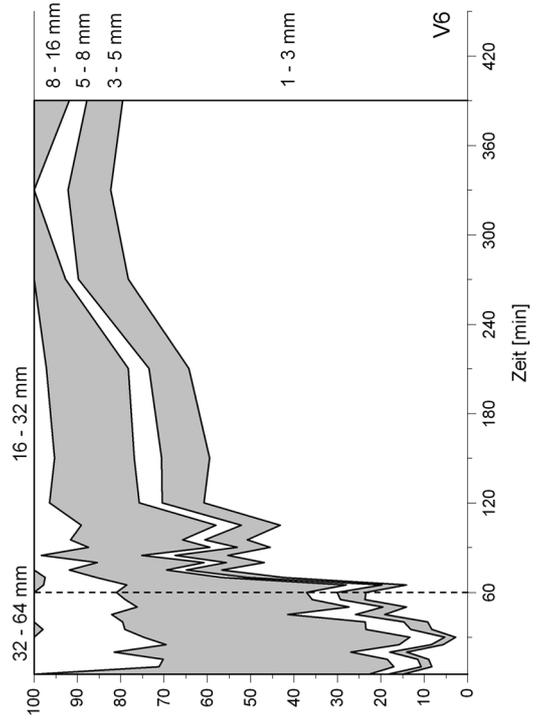
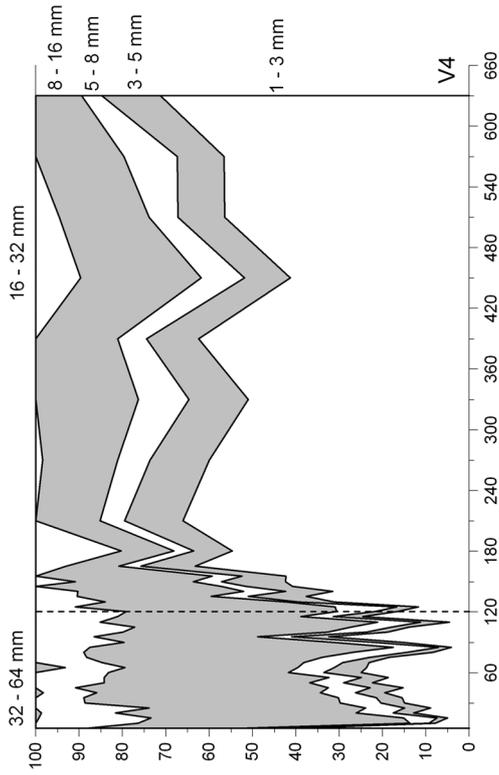


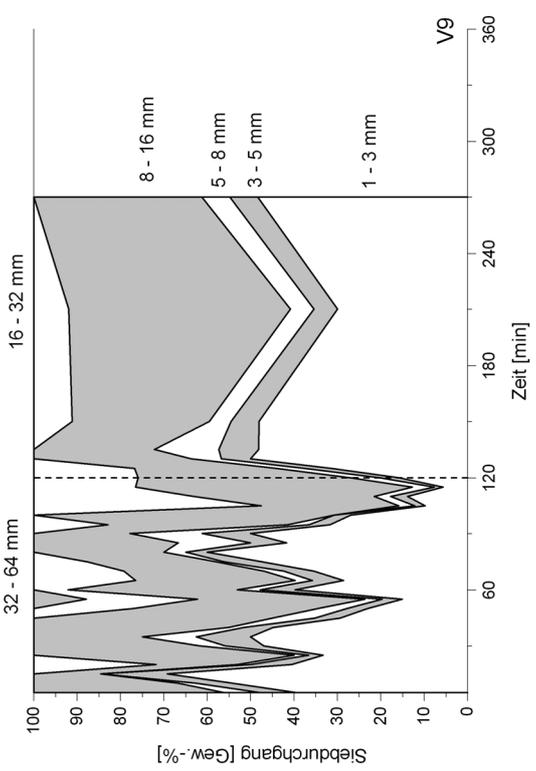
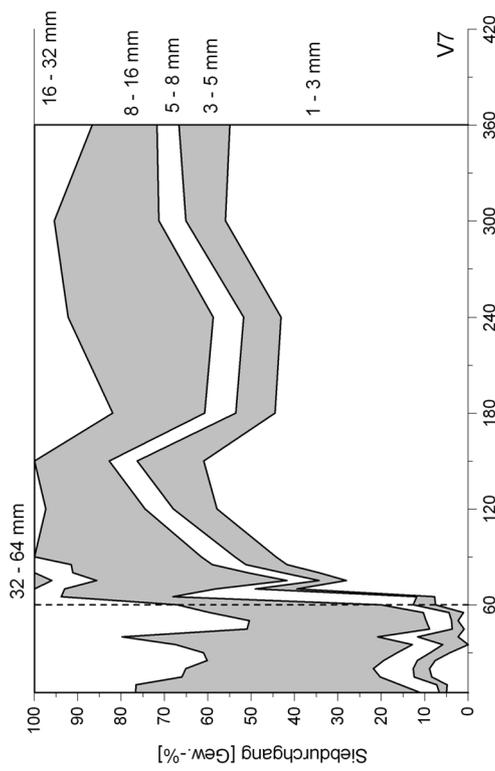
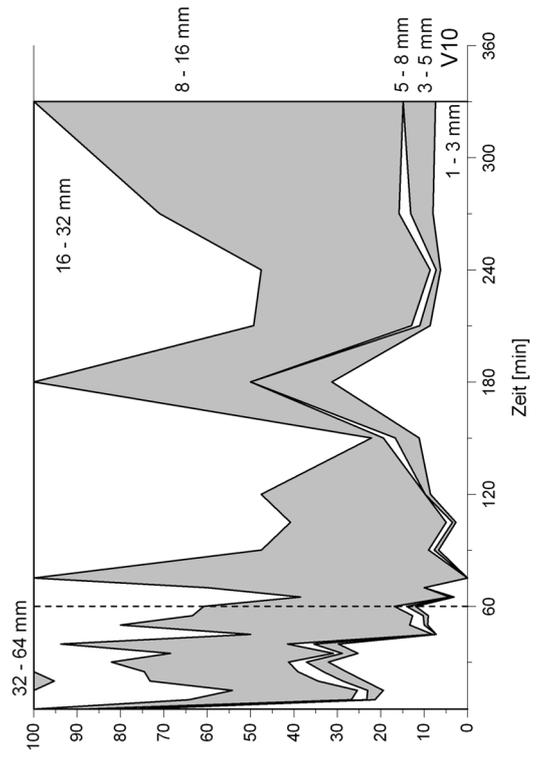
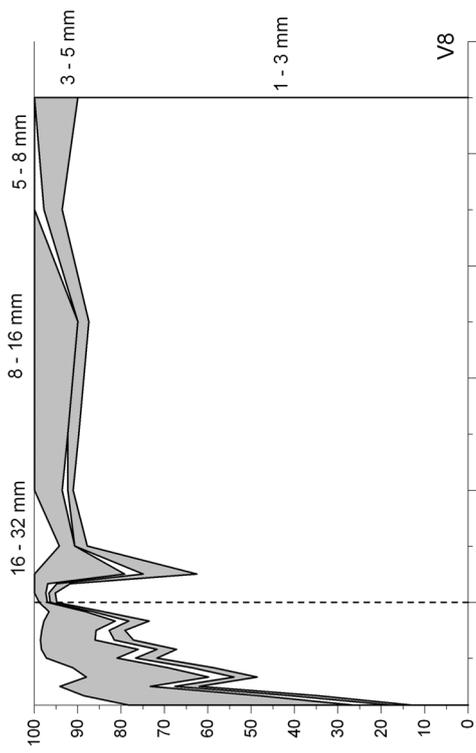


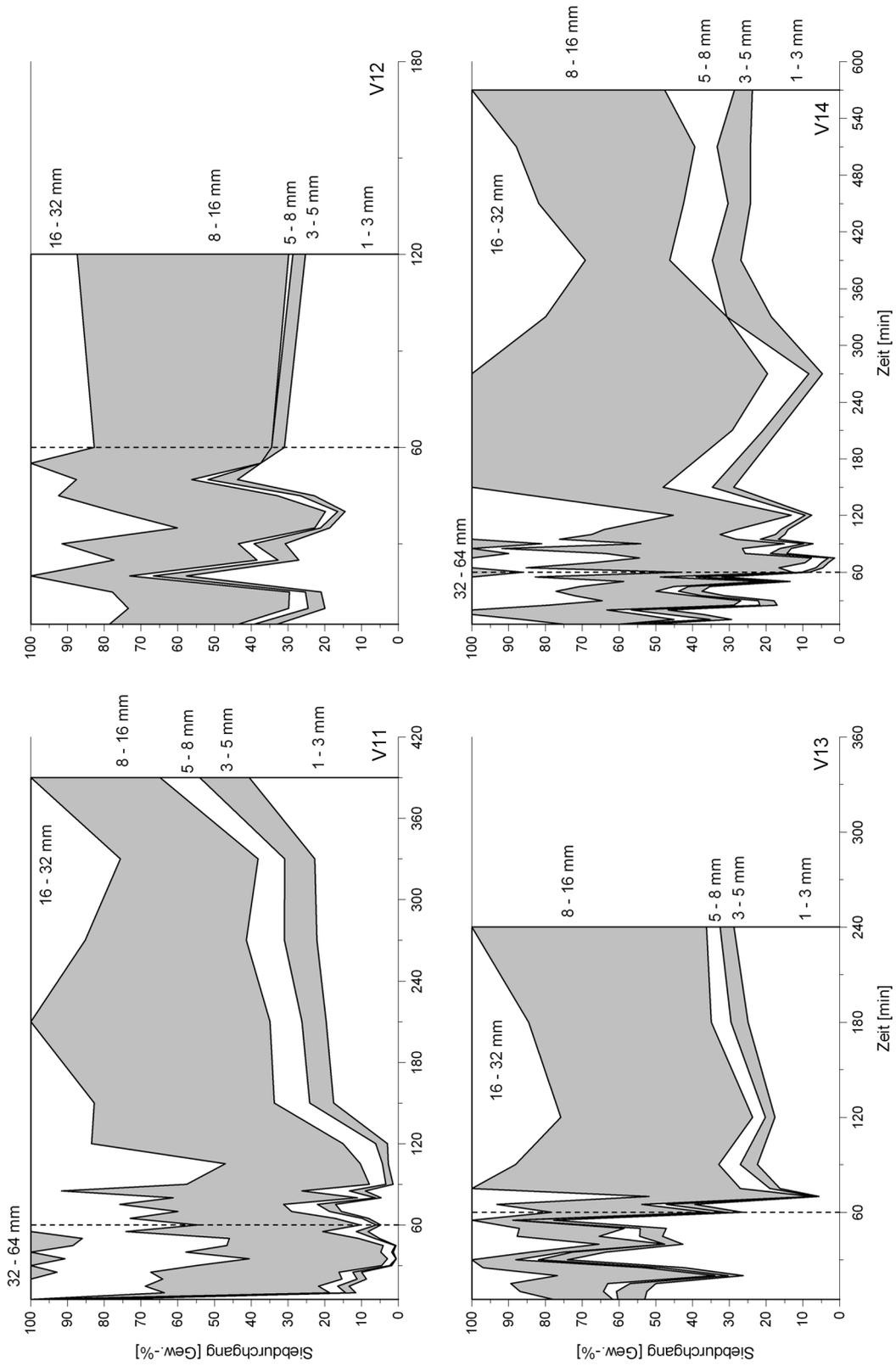
A.6 Darstellung der Kornbänder des erodierten Sohlenmaterials

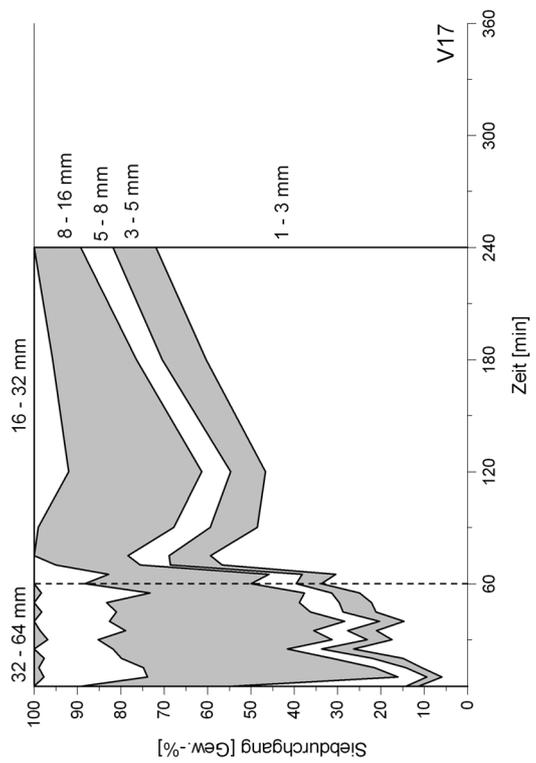
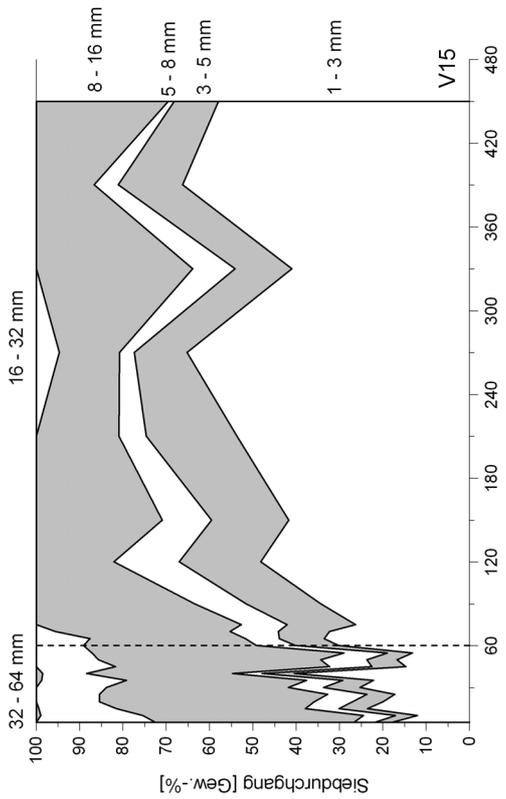
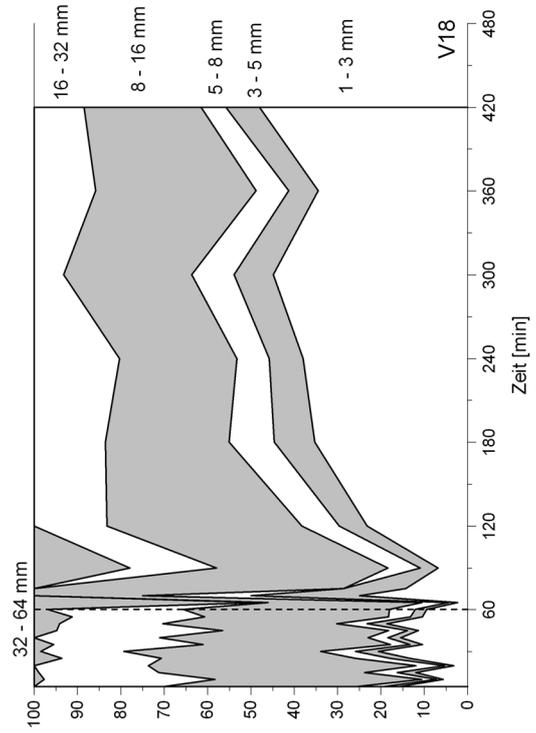
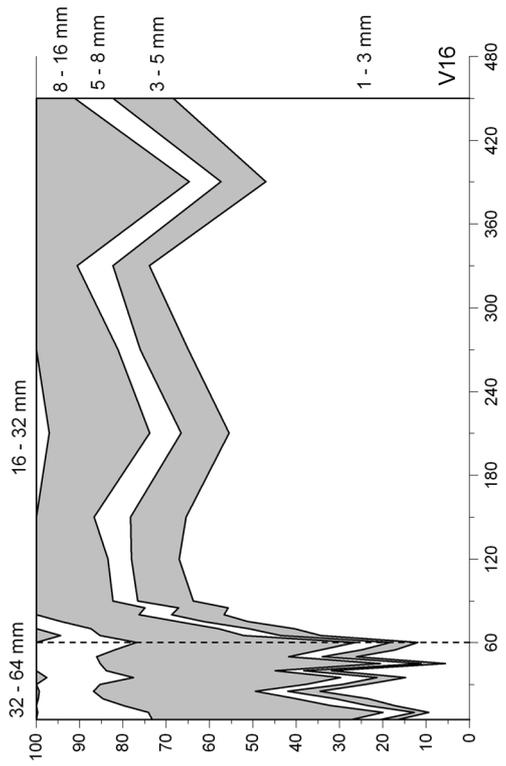




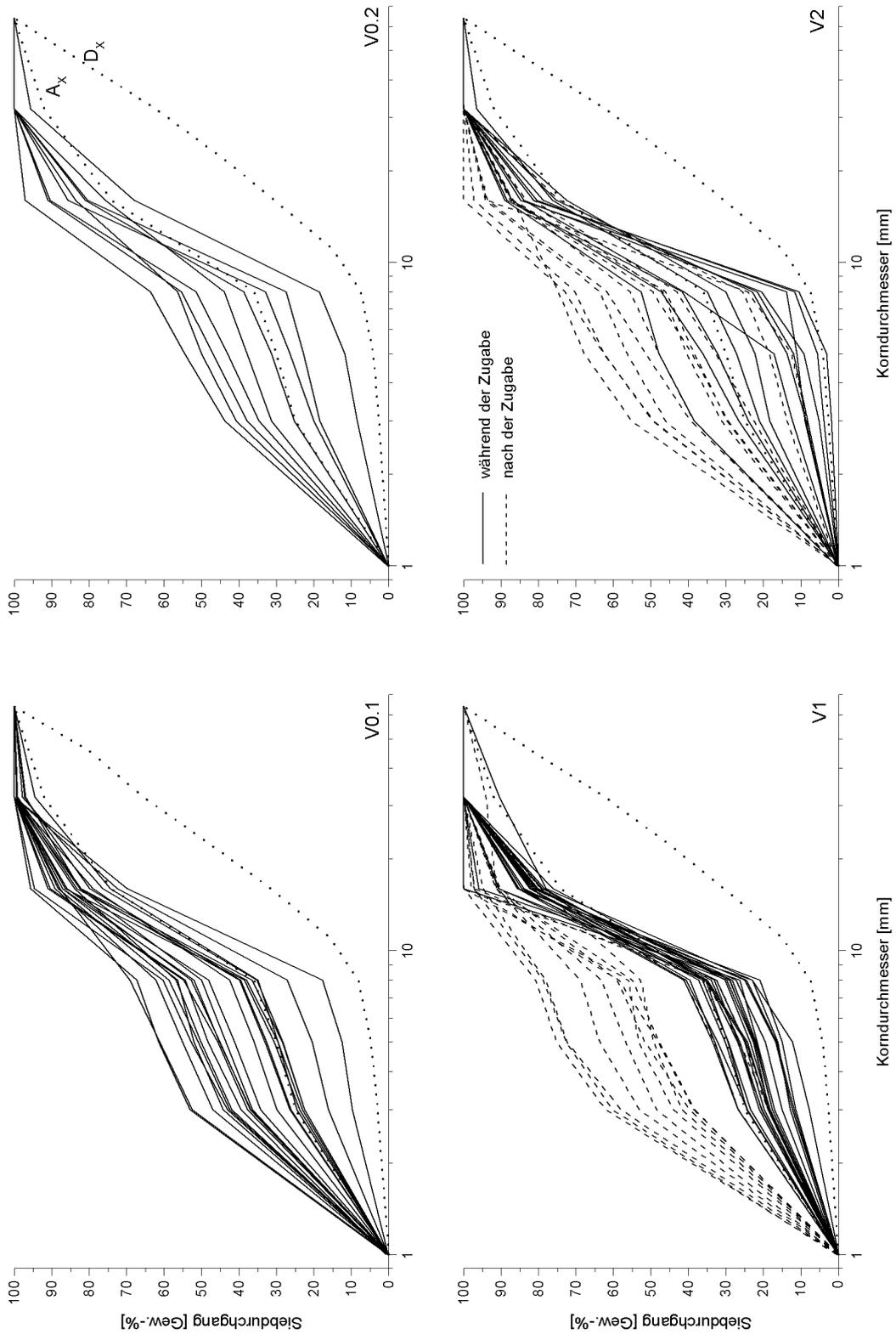


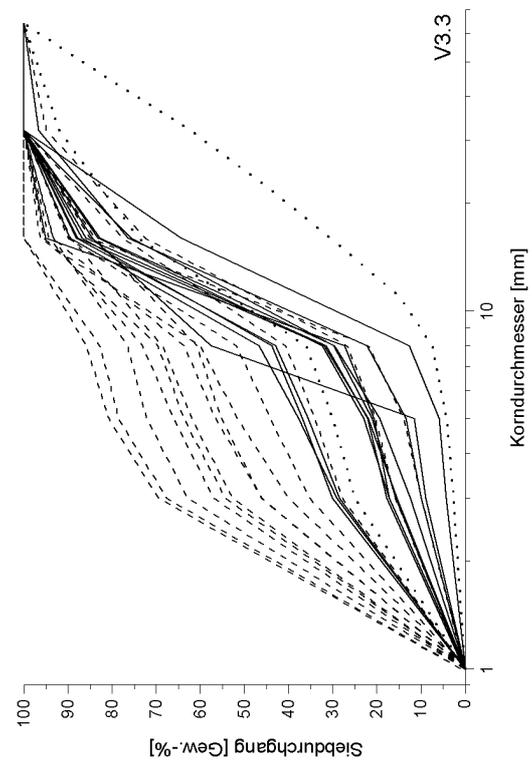
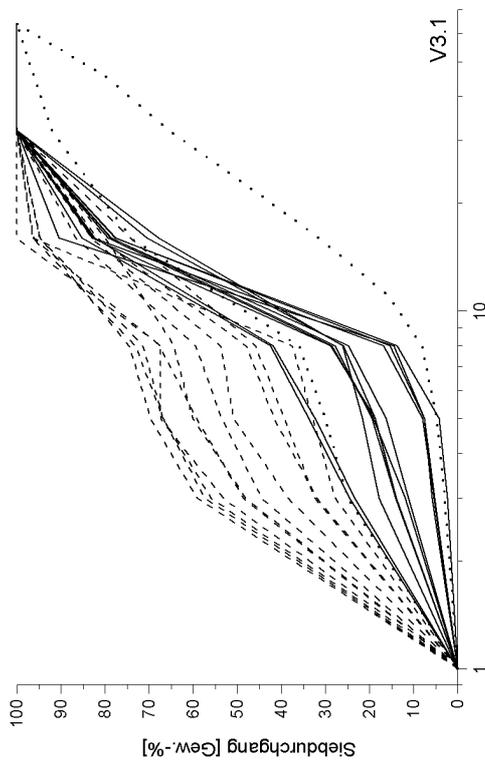
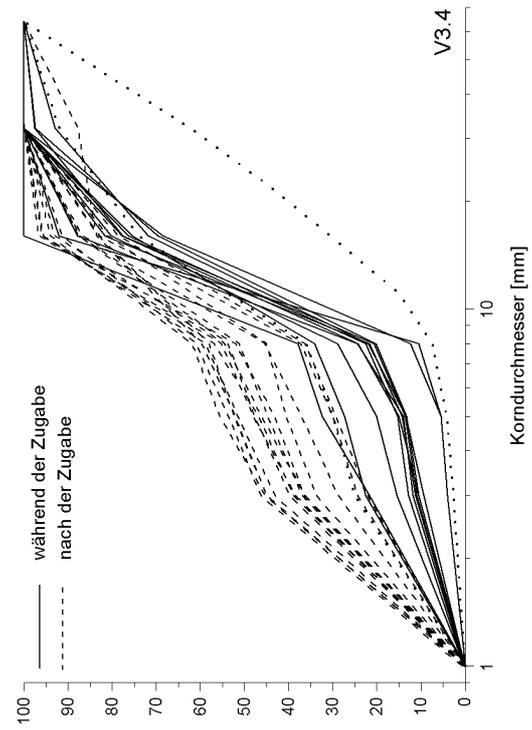
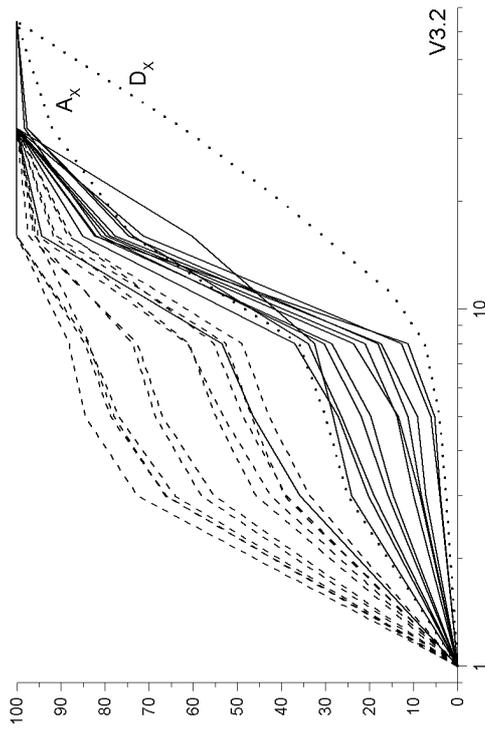


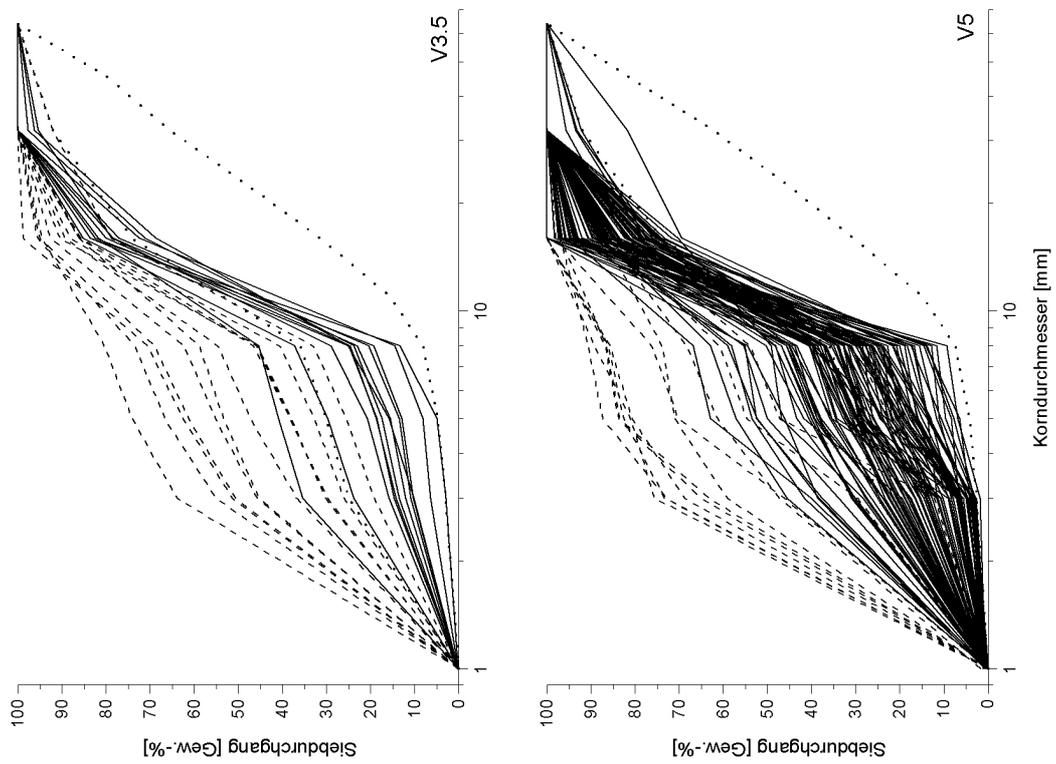
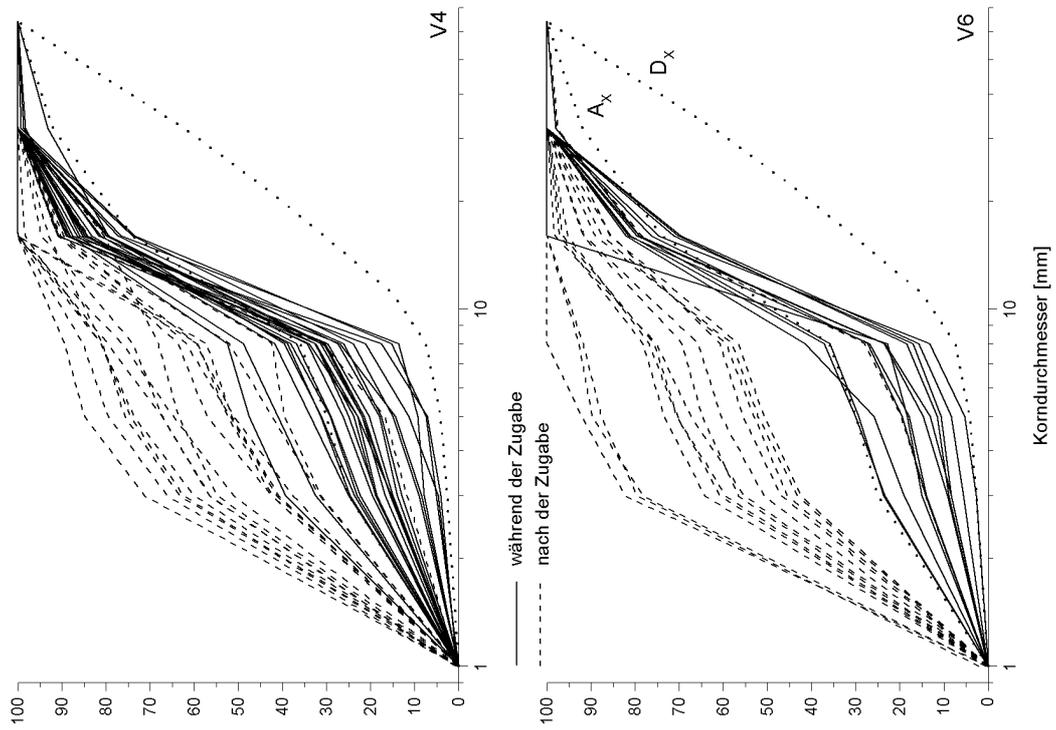


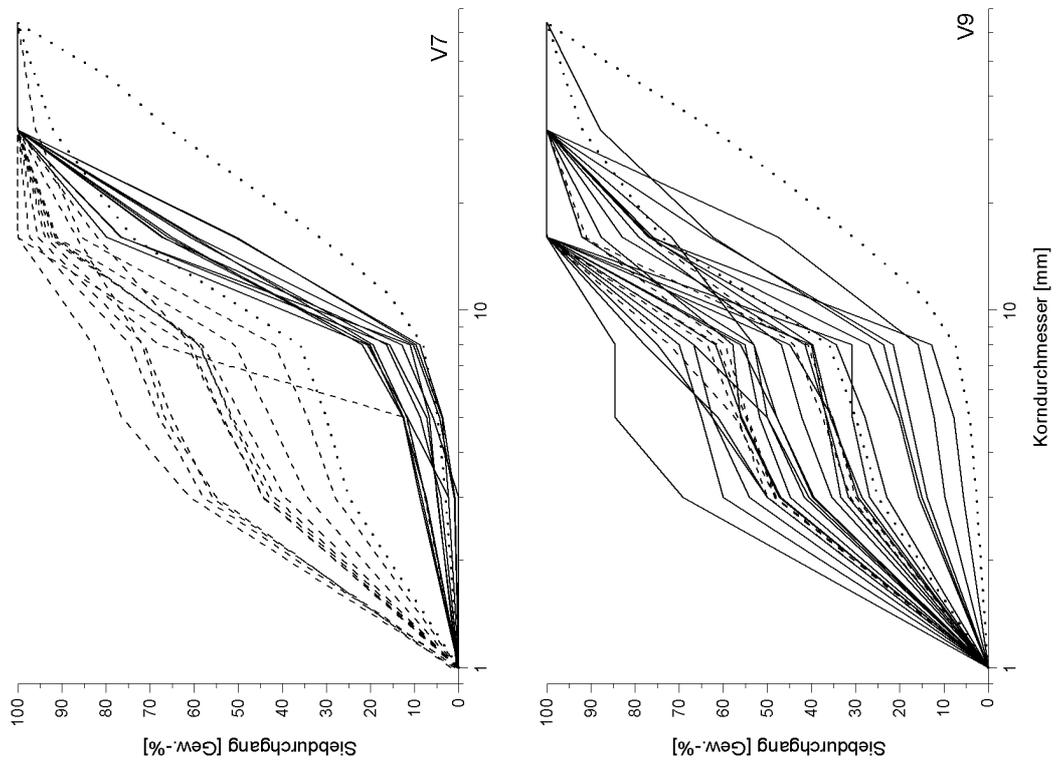
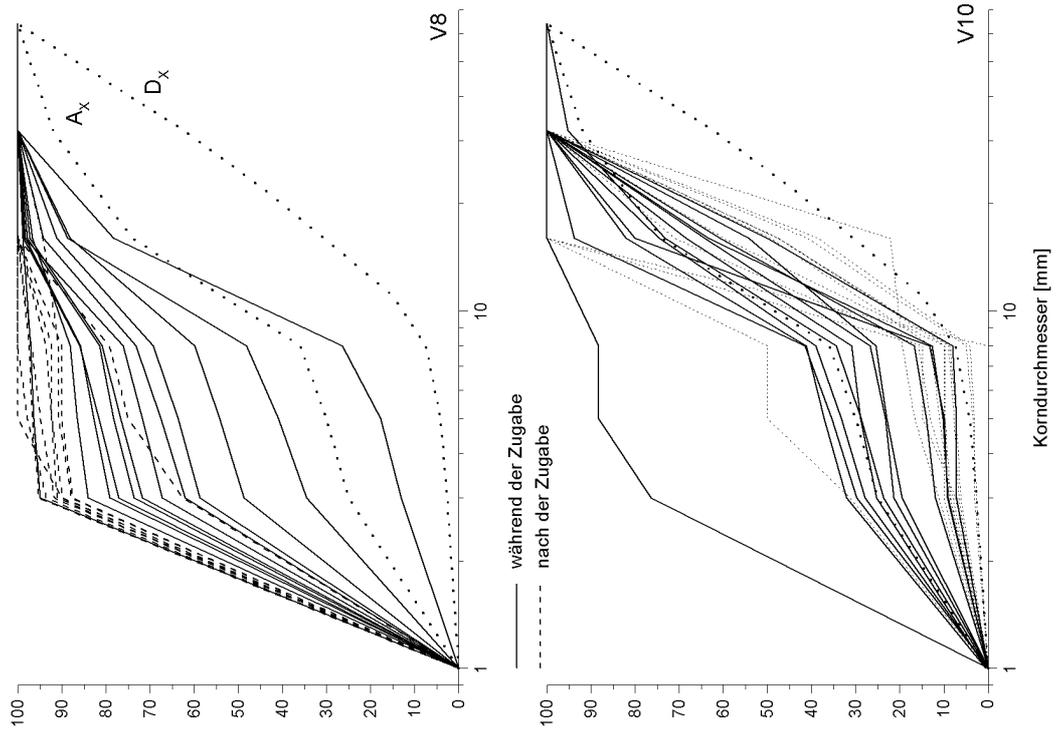


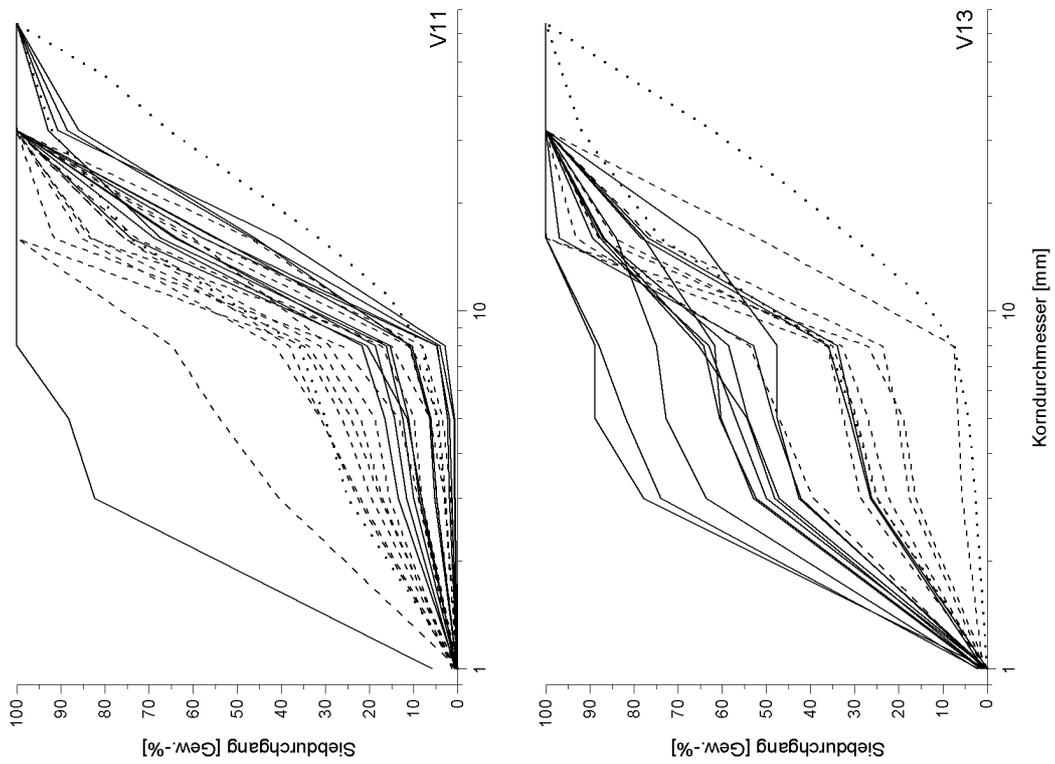
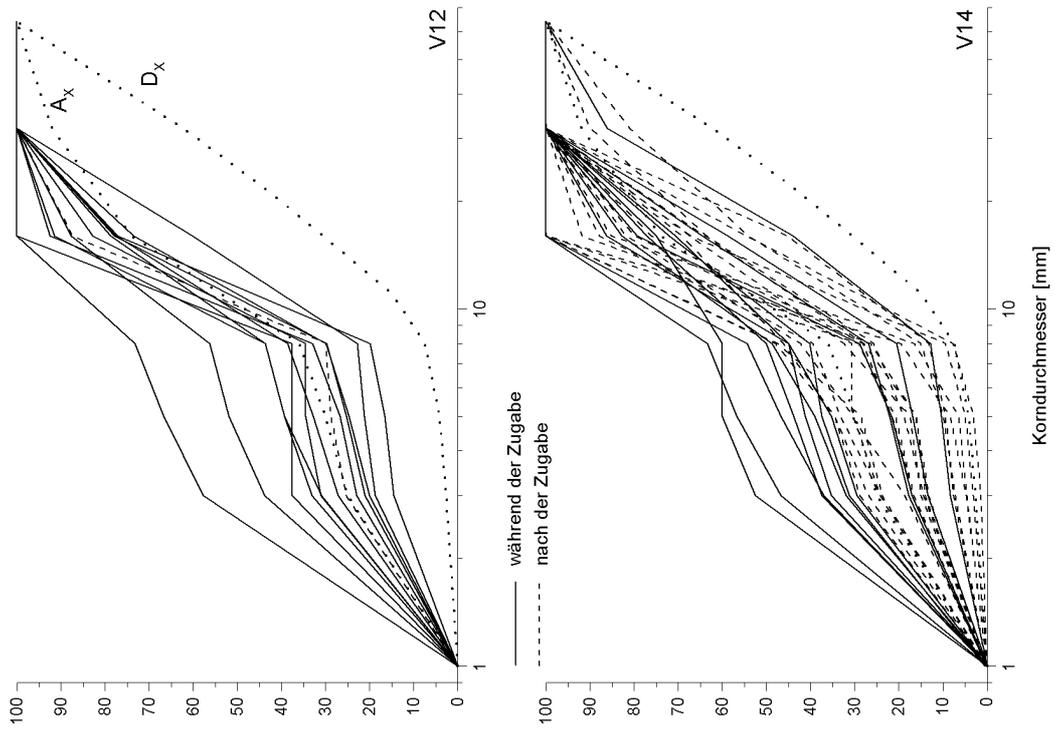
A.7 Darstellung der Sieblinien des erodierten Sohlenmaterials

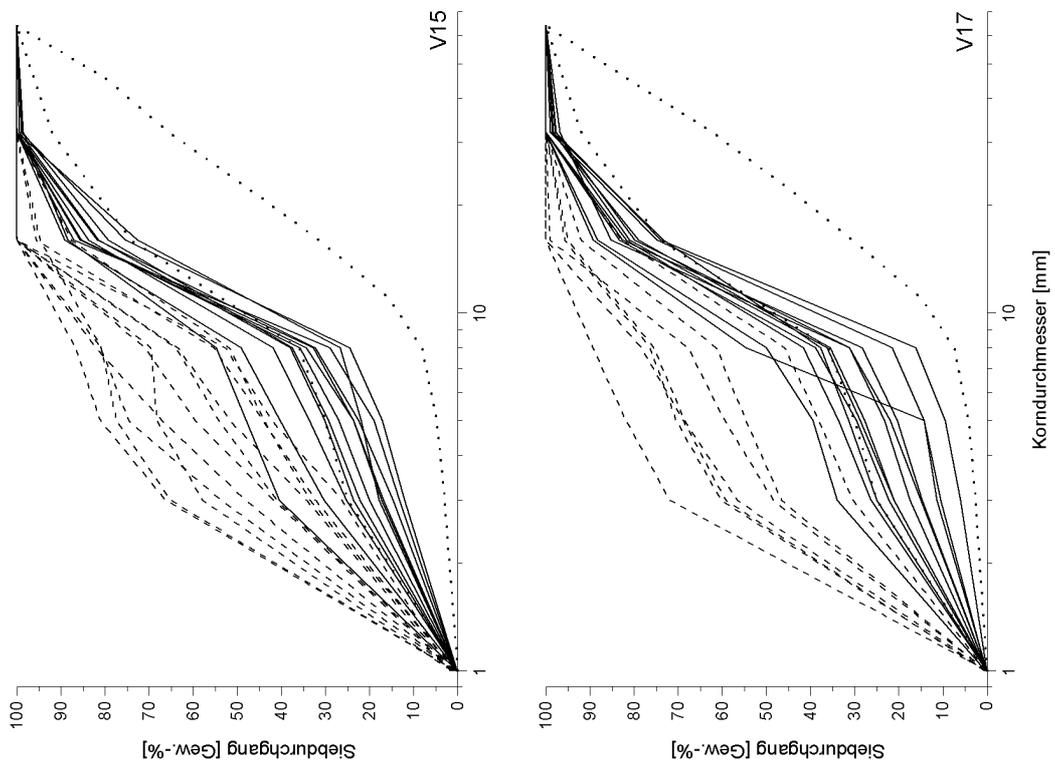
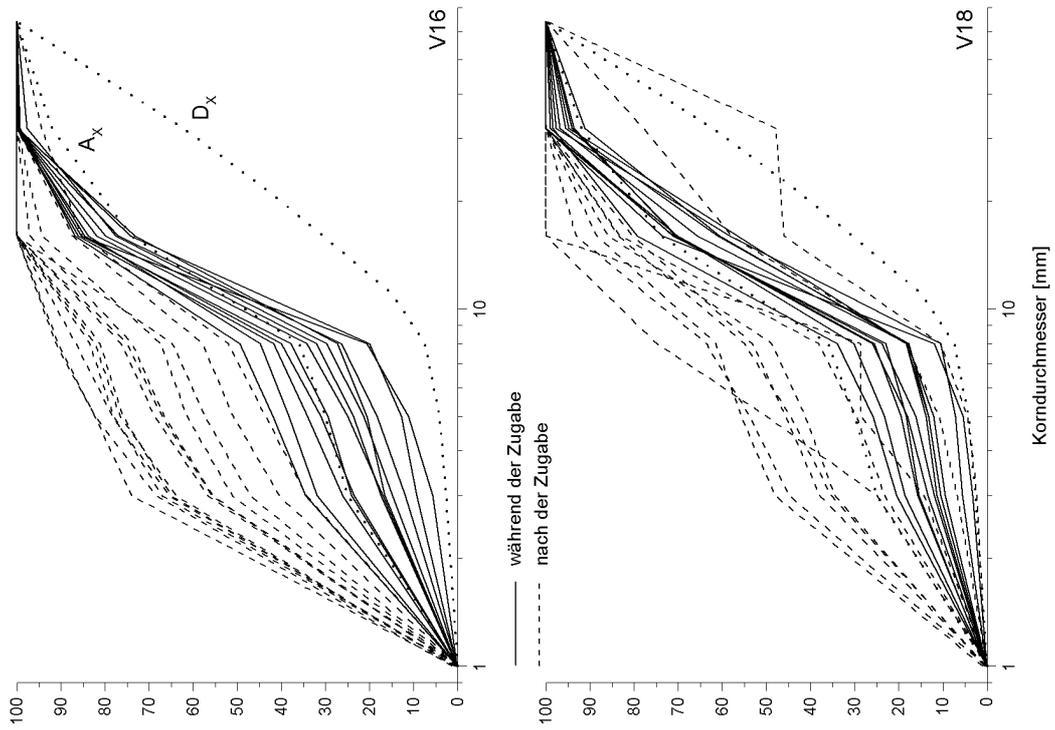












B Datengrundlage zu Kapitel 3

B.1 Vertikale Geschwindigkeitsprofile

z = vertikale Koordinate ab dem tiefsten Punkt der Sohle

\bar{u} = zeitlich gemittelte Geschwindigkeit

$\langle \bar{u} \rangle$ = doppelt gemittelte Geschwindigkeit

$\sigma_{\bar{u}}$ = Standardabweichung der räumlichen Schwankungen

Messpositionen siehe Abb. 3.28

Rauheit	\bar{u} an der Messposition					
	z [cm]	a [cm/s]	b [cm/s]	c [cm/s]	$\langle \bar{u} \rangle$ [cm/s]	$\sigma_{\bar{u}}$ [cm/s]
RK-bil (L1)	0,83		22,80	13,50	18,15	6,58
	0,93		27,10	22,00	24,55	3,61
	1,03		30,40	28,30	29,35	1,48
	1,13		33,50	33,00	33,25	0,35
	1,23		36,00	35,40	35,70	0,42
	1,33	39,20	37,70	38,10	38,33	0,78
	1,53	43,20	42,00	42,10	42,43	0,67
	1,73	45,40	44,80	45,10	45,10	0,30
	1,93	48,30	47,10	48,10	47,83	0,64
	2,13	51,00	49,60	50,50	50,37	0,71
	2,33	53,00	52,50	52,20	52,57	0,40
	2,53	54,60	53,80	54,40	54,27	0,42
2,73	56,40	55,80	55,60	55,93	0,42	

RK-bs (L2)	0,43		1,64	12,48	7,06	7,67
	0,53		2,73	16,40	9,57	9,67
	0,63		4,95	19,70	12,33	10,43
	0,73		15,09	24,52	19,81	6,67
	0,83		29,82	32,17	31,00	1,66
	0,93		37,83	37,34	37,59	0,35
	1,03	40,85	39,86	41,37	40,69	0,77
	1,13	43,88	43,80	43,92	43,87	0,06
	1,23	46,83	45,80	46,54	46,39	0,53
	1,33	48,46	48,40	48,18	48,35	0,15
	1,43	49,25	51,10	49,67	50,01	0,97
	1,63	52,54	52,45	52,81	52,60	0,19
	1,83	54,79	55,09	55,97	55,28	0,61
	2,03	57,35	55,79	57,42	56,85	0,92
	2,43	60,65	60,84	60,82	60,77	0,10
	2,63	61,76	62,53	62,57	62,29	0,46
	3,03	64,93	63,35	65,38	64,55	1,07
	3,23	65,45	64,77	65,96	65,39	0,60
3,43	67,14	66,67	66,76	66,86	0,25	
3,63	67,68	66,20	68,05	67,31	0,98	

Rauheit	\bar{u} an der Messposition					
	z [cm]	a [cm/s]	b [cm/s]	c [cm/s]	$\langle \bar{u} \rangle$ [cm/s]	$\sigma_{\bar{u}}$ [cm/s]
RK-cw (L2)	0,30		0,61	11,84	6,23	7,94
	0,40		1,12	13,71	7,42	8,90
	0,50		1,48	14,41	7,95	9,14
	0,60		1,85	15,30	8,58	9,51
	0,70		3,46	17,42	10,44	9,87
	0,80		13,97	21,87	17,92	5,59
	0,90		27,25	27,54	27,40	0,21
	1,00	33,28	32,49	32,53	32,77	0,45
	1,10	35,69	35,56	36,25	35,83	0,37
	1,20	37,95	38,09	38,34	38,13	0,20
	1,40	42,74	42,52	42,29	42,52	0,23
	1,60	45,29	45,72	45,13	45,38	0,31
	1,80	48,29	48,16	48,35	48,27	0,10
	2,00	50,46	50,50	50,72	50,56	0,14
	2,20	52,68	52,37	52,59	52,55	0,16
	2,40	55,33	54,75	53,93	54,67	0,70
	2,60	56,73	57,40	56,39	56,84	0,51
	2,80	58,60	57,81	57,91	58,11	0,43
	3,00	59,43	59,71	59,18	59,44	0,27
	3,20	61,61	61,17	61,58	61,45	0,25
3,40	62,03	62,03	62,11	62,06	0,05	
3,60	62,86	63,56	63,90	63,44	0,53	
3,80	64,16	64,59	64,39	64,38	0,22	

RK-cw (L3)	0,20		3,12	8,71	5,92	3,95
	0,30		4,59	9,98	7,29	3,81
	0,40		6,31	10,76	8,54	3,15
	0,50		6,80	13,10	9,95	4,45
	0,60		10,68	15,91	13,30	3,70
	0,70		16,88	21,35	19,12	3,16
	0,80		24,25	24,89	24,57	0,45
	0,90		29,96	29,35	29,66	0,43
	1,00	30,57	34,95	33,11	32,88	2,20
	1,10	38,93	36,23	35,22	36,79	1,92
	1,20	38,42	37,45	38,29	38,05	0,53
	1,40	42,49	41,49	41,98	41,99	0,50
	1,60	47,48	44,97	44,30	45,58	1,68
	1,80	50,24	46,85	48,29	48,46	1,70
	2,00	53,13	50,56	50,36	51,35	1,54
	2,20	52,34	57,06	52,40	53,93	2,71
2,80	59,64	55,86	57,77	57,76	1,89	

RK-cd (L3)	0,30		-0,91	1,37	0,23	1,61
	0,40		-2,01	0,19	-0,91	1,56
	0,50		-1,91	1,82	-0,04	2,64
	0,60		-0,88	4,15	1,64	3,56
	0,70		13,69	13,59	13,64	0,07
	0,80		28,26	27,79	28,03	0,33
	0,90		36,13	35,88	36,01	0,18
	1,00		40,59	39,88	40,24	0,50
	1,10	43,91	45,46	43,83	44,40	0,92
	1,20	44,40	47,67	46,62	46,23	1,67
	1,30	48,88	49,21	48,54	48,88	0,34
	1,40	50,70	51,35	49,31	50,45	1,04

Rauheit	\bar{u} an der Messposition					
	z	a	b	c	$\langle \bar{u} \rangle$	$\sigma_{\bar{u}}$
	[cm]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]
Fortsetzung RK-cd (L3)	1,80	55,08	56,19	56,54	55,94	0,76
	2,00	58,45	58,58	57,59	58,21	0,54
	2,20	61,28	61,08	59,71	60,69	0,85
	2,60	63,98	64,61	62,91	63,83	0,86
	2,80	66,35	65,00	63,55	64,97	1,40

Rauheit	\bar{u} an der Messposition							
	z	a	b	c	d	e	$\langle \bar{u} \rangle$	$\sigma_{\bar{u}}$
	[cm]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]
R0-1	0,10	-0,21		-0,26	-0,22	-0,24	-0,23	0,02
	0,20	-0,30		-0,25	-0,31	-0,28	-0,29	0,03
	0,40	-1,16		-5,90	-3,94	-2,75	-3,44	2,00
	0,60	0,64		-3,44	-0,92	-1,61	-1,33	1,69
	0,80	0,95		-3,21	-0,36	-0,20	-0,71	1,77
	1,00	0,32		-0,91	1,91	-0,63	0,17	1,27
	1,20	-1,34		-1,12	2,87	-0,32	0,02	1,95
	1,40	-2,18		1,56	4,81	3,87	2,01	3,11
	1,60	-2,26		6,49	10,77	5,48	5,12	5,43
	1,80	0,28		13,25	16,64	9,02	9,80	7,07
	2,00	6,50		18,54	20,72	10,44	14,05	6,70
	2,20	14,91		22,99	24,42	16,41	19,68	4,72
	2,40	21,69		26,86	25,66	20,70	23,73	2,99
	2,60	25,68		29,43	27,43	26,77	27,33	1,58
	2,80	28,81		33,15	26,99	36,18	31,28	4,16
	3,00	33,02	37,53	35,74	30,90	39,35	35,31	3,39
	3,20	37,53	40,76	37,15	32,53	43,32	38,26	4,08
	3,40	39,62	41,89	41,27	35,10	49,16	41,41	5,08
3,60	42,10	45,06	45,66	39,44	48,90	44,23	3,61	
3,80	44,55	47,61	47,82	42,87	52,21	47,01	3,58	
4,00	47,32	49,36	49,49	47,66	52,86	49,34	2,20	

R0-2	0,10	-0,51		-0,27	-0,29	-0,24	-0,33	0,13
	0,20	-0,29		-0,24	-0,30	-0,27	-0,28	0,03
	0,40	-0,91		-2,98	-3,15	-1,31	-2,09	1,14
	0,60	1,91		-3,50	-2,03	-1,08	-1,17	2,29
	0,80	3,62		-2,21	-2,13	-0,19	-0,22	2,73
	1,00	4,03		-1,42	-2,31	0,29	0,15	2,80
	1,20	4,63		-1,89	-0,14	2,61	1,30	2,89
	1,40	5,72		-1,52	4,32	2,41	2,73	3,14
	1,60	5,91		4,90	8,31	5,86	6,24	1,45
	1,80	8,22		14,33	13,88	10,49	11,73	2,90
	2,00	10,76		19,60	18,24	13,68	15,57	4,09
	2,20	13,74		23,71	21,50	16,32	18,82	4,59
	2,40	18,10		27,87	23,17	20,69	22,46	4,16
	2,60	22,82		32,47	24,56	28,46	27,08	4,30
	2,80	30,07		35,71	26,58	36,14	32,12	4,62
	3,00	35,55	35,71	37,68	29,44	42,50	36,17	4,70
	3,25	41,58	43,29	42,77	32,93	45,33	41,18	4,81
	3,50	44,34	45,39	45,22	36,10	49,73	44,16	4,97

Rauheit	\bar{u} an der Messposition							$\sigma_{\bar{u}}$
	z	a	b	c	d	e	$\langle \bar{u} \rangle$	
	[cm]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]
Fortsetzung R0-2	3,75	46,65	48,45	47,69	41,34	50,02	46,83	3,30
	4,00	49,04	49,81	52,40	45,06	54,41	50,14	3,55
	4,25	53,97	52,73	54,83	50,51	56,70	53,75	2,32
	4,50	54,56	56,36	57,42	53,20	58,33	55,98	2,09
	4,75	57,35	58,48	58,82	58,74	59,66	58,61	0,83
	5,00	59,14	61,09	61,41	60,98	62,29	60,98	1,15
	5,25	62,51	63,33	63,04	62,81	64,31	63,20	0,69
	5,50	63,69	64,67	66,31	66,04	65,55	65,25	1,07
	5,75	66,31	67,30	68,14	67,57	67,76	67,41	0,69
	6,00	68,84	68,50	70,99	69,12	69,06	69,30	0,97
6,25	70,97	70,64	70,36	71,12	71,59	70,94	0,47	

R0-3	0,10	-0,25		-0,25	-0,25	-0,41	-0,29	0,08
	0,20	-0,30		-0,26	-0,40	-0,23	-0,30	0,07
	0,40	-1,46		-2,95	-3,28	0,05	-1,91	1,52
	0,60	2,05		-3,07	-1,95	0,09	-0,72	2,26
	0,80	4,44		-1,82	-2,98	0,62	0,07	3,28
	1,00	3,72		-1,24	-1,70	-0,23	0,14	2,47
	1,20	4,51		-1,12	-0,87	-2,25	0,07	3,02
	1,40	5,50		-2,11	4,49	-1,22	1,66	3,89
	1,60	6,81		-1,01	7,72	3,46	4,24	3,96
	1,80	8,36		7,94	12,68	9,22	9,55	2,15
	2,00	10,33		16,92	17,57	11,67	14,12	3,66
	2,20	13,65		23,03	20,10	12,73	17,38	5,00
	2,40	16,12		25,89	21,82	17,59	20,36	4,41
	2,60	20,17		28,65	22,44	25,58	24,21	3,70
	2,80	27,71		31,46	24,24	32,68	29,02	3,82
	3,00	34,23	34,65	34,77	26,33	38,42	33,68	4,44
	3,50	39,48		41,24	33,68	44,76	39,79	4,63
	4,00	44,21	46,09	45,96	42,36	49,00	45,52	2,47
	4,50	49,20		50,57	48,38	51,81	49,99	1,52
	5,00	53,09	54,25	53,74	53,90	55,62	54,12	0,94
5,50	57,85	57,62	58,06	57,38	59,42	58,07	0,79	
6,00	61,27	60,04	61,12	61,09	62,01	61,10	0,70	
6,50	64,01	64,36	64,11	63,82	65,10	64,28	0,50	
7,00	65,68	66,62	65,81	65,69	66,67	66,10	0,51	
7,50	67,56	68,59	69,02	67,99	69,32	68,49	0,72	
8,00	70,61	71,38	71,76	69,78	70,05	70,72	0,85	
8,50	72,38	72,28	72,32	72,79	72,22	72,40	0,23	
9,00	73,22	74,44	74,14	73,82	74,47	74,02	0,52	
9,50	73,96	75,47	75,40	75,14	76,28	75,25	0,84	

R0-4	0,10	-0,18		-0,28	-0,29	-0,23	-0,24	0,05
	0,20			-0,26	-0,33	-0,33	-0,31	0,04
	0,40	0,81		-1,86	-1,83	-1,05	-0,98	1,25
	0,60	2,86		-1,34	0,81	-0,91	0,36	1,91
	0,80	4,14		-0,58	-0,10	-0,74	0,68	2,32
	1,00	3,63		0,00	0,72	-0,72	0,91	1,90
	1,20	3,32		-0,13	1,30	-2,07	0,61	2,27
	1,40	3,94		-0,12	2,71	2,12	2,16	1,70

Rauheit	\bar{u} an der Messposition							$\sigma_{\bar{u}}$
	z	a	b	c	d	e	$\langle \bar{u} \rangle$	
	[cm]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]
Fortsetzung R0-4	1,60	4,79		2,74	6,91	3,51	4,49	1,82
	1,80	7,06		10,25	11,74	7,14	9,05	2,33
	2,00	10,24		15,93	16,54	10,87	13,40	3,30
	2,20	14,07		19,95	19,19	13,47	16,67	3,37
	2,40	16,90		22,19	19,63	17,45	19,04	2,41
	2,60	19,63		24,88	21,81	21,30	21,90	2,19
	2,80	24,16		26,92	23,16	26,96	25,30	1,94
	3,00	29,93	29,48	27,38	24,72	33,04	28,91	3,10
	3,50	35,50		35,19	30,28	38,67	34,91	3,46
	4,00	40,76	39,67	39,79	38,48	42,19	40,18	1,39
	4,50	43,49	44,41	45,12	45,33	45,19	44,71	0,77
	5,00	47,28	47,85	49,74	48,44	49,06	48,47	0,97
	5,50	51,20	50,87	50,71	51,89	50,75	51,08	0,49
	6,00	52,65	53,19	53,68	53,53	52,91	53,19	0,42
	7,00	57,31	58,26	59,12	58,38		58,27	0,74
	8,00	61,57	62,83	61,57	62,35	62,50	62,16	0,57
	9,00	65,67	64,89	65,78	66,10		65,61	0,52
10,00	68,49	67,77	68,31	68,99	68,32	68,37	0,44	
11,00	71,32	71,47	72,16	70,95	70,01	71,18	0,79	
12,00	73,77	73,49	73,76	73,67		73,67	0,13	
13,00	75,13	75,34				75,24	0,15	
14,00	75,92	75,80				75,86	0,09	

RI-1	0,1	-3,80	-4,36	-4,10	-4,17	-3,75	-4,03	0,26
	0,2	-3,58	-4,41	-3,22	-8,87	-3,81	-4,78	2,33
	0,3	-6,75	-3,84	-3,63	-6,28	-4,09	-4,92	1,48
	0,4	-5,02	-4,02	-5,17	-4,22	-4,44	-4,57	0,50
	0,5	-5,09	-3,29	-6,52	-5,19	-4,99	-5,02	1,15
	0,6	-6,57	-4,08	-9,36	-5,62	-4,14	-5,95	2,17
	0,7	-6,18		-6,06	-3,91	-5,01	-5,29	1,06
	0,8	-3,98	-2,95	-6,96	-3,01	-2,44	-3,87	1,82
	0,9	-3,91	-2,89	-12,04	-3,92	-1,99	-4,95	4,04
	1,1	-1,68	-2,44	-6,77	-3,06	-0,91	-2,97	2,27
	1,2	-0,45	-2,23	-4,01	-2,92	0,76	-1,77	1,92
	1,3	1,09	-0,19	0,69	-1,34	2,08	0,46	1,30
	1,4	1,37	1,88	3,25	-0,20	2,67	1,79	1,33
	1,5	1,82	2,71	5,89	-0,01	3,19	2,72	2,15
	1,6	3,34	5,42	7,17	0,31	3,69	3,98	2,56
	1,7	4,05	7,35	10,10	2,34	4,05	5,58	3,11
	1,8	4,68	9,09	13,78	4,00	6,06	7,52	4,01
	1,9	4,74	9,83	16,88	6,00	6,56	8,80	4,89
	2,0	7,15	12,19	21,60	7,07	8,74	11,35	6,09
	2,1	7,31	12,49	23,07	7,74	12,51	12,62	6,35
2,2	11,87	13,54	25,84	9,60	16,92	15,55	6,34	
2,3	12,53	15,31	27,91	10,75	19,68	17,24	6,85	
2,4	15,81	14,27	31,16	13,09	23,05	19,48	7,59	
2,5	18,63	17,33	31,12	16,11	27,36	22,11	6,70	
2,6	21,06	18,82	32,54	16,02	29,75	23,64	7,15	
2,7	24,85	20,86	34,35	17,90	31,48	25,89	6,95	
2,9	27,72	23,68	35,66	19,49	33,38	27,98	6,69	

Rauheit	\bar{u} an der Messposition							$\sigma_{\bar{u}}$
	z	a	b	c	d	e	$\langle \bar{u} \rangle$	
	[cm]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]
Fortsetzung RI-1	3,0	29,38	23,02	35,42	21,72	35,42	28,99	6,55
	3,2	30,62	25,37	36,70	22,56	35,73	30,20	6,22
	3,3	31,50	25,38	38,65	26,32	37,79	31,93	6,21
	3,4	33,85	26,26	38,93	23,89	39,36	32,46	7,13
	3,5	33,67	26,92	39,69	26,33	39,91	33,30	6,59
	3,6	35,96	29,77	40,45	27,18	42,33	35,14	6,57
	3,7	34,42	29,96	42,27	27,22	41,87	35,15	6,82
	3,8	34,62	32,27	42,23	29,16	42,23	36,10	5,92
	4,0	38,13	31,42	44,46	30,00	44,71	37,74	6,96
	4,4	42,92	35,03	47,07	31,19	47,35	40,71	7,29
	4,6	42,02	39,49	48,03	35,79	44,89	42,04	4,73
5,0	47,41	42,73	49,49	37,78	48,93	45,27	4,96	

RI-2	0,1	-5,71	-4,37	-4,71	-4,80	-3,54	-4,63	0,78
	0,2	-4,11	-3,48	-6,17	-3,50	-4,22	-4,30	1,10
	0,4	-4,80	-5,01	-7,48	-5,06	-3,77	-5,23	1,37
	0,5	-6,43	-3,77	-7,27	-3,37	-4,72	-5,11	1,69
	0,6	-7,05	-2,02	-5,34	-3,94	-3,11	-4,29	1,96
	0,7	-4,29	-2,88	-5,69	-4,14	-2,36	-3,87	1,31
	0,8	-4,87	-2,89	-8,07	-3,34	-3,00	-4,43	2,19
	0,9	-4,18	-3,24	-5,39	-3,23	-2,32	-3,67	1,17
	1,0	-2,23	-2,16	-2,66	-1,99	-0,12	-1,83	0,99
	1,1	-0,39	-1,56	0,30	-2,34	0,36	-0,72	1,19
	1,2	1,52	-1,37	2,17	0,12	2,30	0,95	1,56
	1,3	1,82	0,79	1,88	0,73	2,91	1,63	0,90
	1,4	1,74	2,62	5,60	2,20	3,77	3,19	1,54
	1,5	3,32	4,49	8,58	2,25	4,31	4,59	2,40
	1,6	4,69	7,41	11,29	3,83	4,96	6,44	3,02
	1,7	6,47	8,14	14,47	5,13	6,13	8,07	3,74
	1,8	7,71	11,68	17,98	5,50	7,07	9,99	5,02
	1,9	9,22	12,69	22,77	7,20	7,99	11,97	6,39
	2,0	10,45	15,46	27,05	9,49	10,95	14,68	7,29
	2,1	11,99	16,89	30,60	11,32	14,90	17,14	7,86
	2,2	13,98	18,36	32,58	13,20	19,94	19,61	7,79
	2,3	17,68	17,68	35,01	15,21	22,37	21,59	7,93
	2,4	21,45	19,78	36,53	16,46	26,79	24,20	7,84
	2,5	24,18	22,27	39,13	19,05	28,48	26,62	7,78
	2,6	26,41	21,33	39,12	22,69	32,07	28,33	7,33
	2,7	29,29	23,45	41,00	24,37	36,35	30,89	7,62
	2,8	30,73	25,64	41,88	24,80	36,96	32,00	7,35
	2,9	34,13	26,72	42,11	27,29	38,69	33,79	6,81
	3,0	35,31	27,69	42,89	29,74	38,22	34,77	6,20
	3,1	35,56	29,75	45,91	29,18	40,70	36,22	7,17
	3,3	37,58	31,74	45,86	31,98	44,62	38,35	6,72
3,4	38,81	33,93	45,77	33,65	45,34	39,50	5,90	
3,5	39,83	34,02	48,34	32,94	45,64	40,15	6,84	
3,6	41,23	34,29	49,42	33,14	45,80	40,78	7,08	
3,8	41,15	36,40	48,76	38,00	46,05	42,07	5,25	
4,0	44,97	39,81	50,21	38,02	47,58	44,12	5,14	
4,6	49,53	42,07	53,82	41,91	49,41	47,35	5,20	
4,8	51,61	46,10	54,23	42,52	51,93	49,28	4,81	
5,0	52,02	48,30	56,96	41,26	51,05	49,92	5,76	
5,2	51,90	48,00	58,14	42,24	53,41	50,74	5,98	
5,4	53,10	51,33	57,07	42,40	55,66	51,91	5,76	

Rauheit	\bar{u} an der Messposition							$\langle \bar{u} \rangle$	$\sigma_{\bar{u}}$
	z	a	b	c	d	e	[cm/s]		
	[cm]	[cm/s]							
Fortsetzung RI-2	5,6	54,99	51,52	58,01	44,04	56,34	52,98	5,54	
	5,8	56,31	53,13	59,26	48,08	55,10	54,38	4,16	
	6,2	57,92	56,73	59,08	50,01	56,60	56,07	3,53	
	6,4	59,83	57,28	63,00	48,17	55,63	56,78	5,56	
	6,6	61,19	57,75	60,72	51,25	57,35	57,65	3,97	
	6,8	61,99	59,02	62,67	50,25	59,65	58,72	4,97	
	7,0	61,49	60,24	62,43	53,73	59,55	59,49	3,41	

RI-3	0,1	-4,05	-4,75	-5,52	-4,86	-4,61	-4,76	0,53
	0,2	-4,40	-3,98	-4,20	-4,38	-7,95	-4,98	1,67
	0,3	-4,87	-5,14	-4,28	-10,10	-4,66	-5,81	2,42
	0,4	-7,07	-5,93	-6,35	-4,59	-6,59	-6,11	0,94
	0,5	-13,79	-2,69	-6,15	-6,72	-4,84	-6,84	4,18
	0,6	-9,42	-1,38	-5,45	-5,87	-4,20	-5,26	2,91
	0,7	-4,35	-0,71	-6,14	-2,29	-3,63	-3,43	2,06
	0,9	-4,35	-0,88	-3,00	-3,21	-2,31	-2,75	1,28
	1,0	-3,39	-0,42	-2,09	-2,85	-0,48	-1,85	1,36
	1,1	-2,74	-0,03	-0,41	-2,13	1,34	-0,79	1,65
	1,2	-0,67	2,56	0,71	1,50	2,55	1,33	1,36
	1,3	0,71	3,38	2,42	1,79	4,06	2,48	1,31
	1,4	1,21	6,06	3,57	3,58	4,41	3,76	1,75
	1,5	4,15	10,16	7,27	4,16	6,78	6,50	2,50
	1,6	6,52	13,40	11,80	6,02	6,79	8,91	3,43
	1,7	8,31	17,92	14,63	7,73	7,95	11,31	4,69
	1,8	10,32	21,11	19,11	11,88	7,84	14,05	5,76
	1,9	14,13	23,85	23,96	14,85	9,94	17,35	6,27
	2,1	18,34	29,14	27,56	20,94	15,63	22,32	5,84
	2,2	20,31	29,76	30,10	23,97	17,93	24,41	5,48
	2,3	24,30	30,46	32,57	27,21	21,85	27,28	4,37
	2,4	25,14	35,09	35,66	30,58	25,77	30,45	4,97
	2,5	28,38	35,79	37,47	32,23	27,94	32,36	4,28
	2,6	28,82	39,96	37,35	34,86	29,35	34,07	4,90
	2,7	32,08	38,34	36,47	40,35	32,58	35,96	3,59
	2,8	33,50	40,04	38,42	42,86	35,42	38,05	3,70
	2,9	33,33	41,19	38,25	43,20	38,57	38,91	3,72
	3,0	36,61	44,47	37,14	46,50	37,04	40,35	4,75
	3,3	38,78	47,32	43,23	45,23	41,35	43,18	3,32
	3,4	39,91	47,34	41,18	51,73	40,27	44,08	5,23
	3,5	40,06			53,23	44,63	45,97	6,69
	3,6	39,81	49,89	44,68	54,10	44,84	46,66	5,48
	4,0	40,66	53,45	46,52	56,56	51,05	49,65	6,22
4,2	43,81	58,23	47,90	58,32	47,09	51,07	6,75	
4,4	46,49	56,61	49,98	61,40	50,74	53,04	5,92	
4,8	48,82	60,96	51,02	63,15	51,17	55,02	6,53	
5,2	52,52	63,20	54,17	62,92	52,73	57,11	5,47	
5,4	53,75	65,06	55,68	64,67	56,12	59,05	5,38	
6,0	57,47	67,92	57,95	70,39	56,59	62,06	6,55	
6,2	58,93	70,82	57,90	68,16	59,62	63,08	5,95	
6,4	60,67	69,42	57,94	69,22	59,47	63,34	5,54	
6,6	60,26	71,52	59,60	70,02	59,11	64,10	6,12	
6,8	60,13	73,10	59,29	69,90	62,11	64,90	6,21	
7,0	62,50	74,07	59,98	69,29	63,53	65,88	5,71	
7,5		76,63	64,65	71,23	64,67	69,29	5,79	
8,0	69,60	77,91	64,95	72,54	65,63	70,12	5,33	

Rauheit	\bar{u} an der Messposition							$\sigma_{\bar{u}}$
	z	a	b	c	d	e	$\langle \bar{u} \rangle$	
	[cm]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]
Fortsetzung RI-3	8,5	69,33	79,98	66,04	74,06	69,52	71,79	5,40
	9,0	72,71	80,39	69,95	75,62	71,29	73,99	4,15
	9,5	73,25	82,50	72,53	76,97	72,05	75,46	4,39
	10,0	74,22	82,79	73,51	77,16	73,30	76,20	4,00
	10,5	77,04	83,30	75,14	76,78	75,11	77,47	3,38

RI-4	0,1	-2,42	-4,33	-4,54	-5,67	-6,93	-4,78	1,68
	0,2	-5,02	-4,43	-4,53	-4,65	-4,69	-4,66	0,22
	0,3	-8,46	-10,55	-4,63	-4,83	-6,09	-6,91	2,54
	0,4	-2,20	-6,54	-5,61	-5,30	0,44	-3,84	2,90
	0,5	-7,65	-3,38	-5,56	-9,40	-5,88	-6,37	2,27
	0,6	-8,40	-1,18	-6,89	-6,21	-4,36	-5,41	2,77
	0,7	-5,31	-0,97	-9,88	-4,22	-4,55	-4,98	3,20
	0,8	-7,37	-2,01	-6,42	-4,38	-3,19	-4,67	2,22
	0,9	-4,50	-0,19	-6,27	-2,20	-2,35	-3,10	2,34
	1,0	-3,13	-0,72	-5,19	-3,71	2,17	-2,12	2,88
	1,1	-3,29	1,57	-3,76	-1,22	3,32	-0,68	3,07
	1,2	2,59	3,34	-0,76	-0,70	6,28	2,15	2,97
	1,3	3,43	3,70	1,26	-0,63	9,44	3,44	3,78
	1,4	5,13	6,44	1,36	0,49	9,48	4,58	3,70
	1,5	11,28	9,95	5,40	0,98	9,41	7,40	4,21
	1,6	17,16	11,90	9,33	3,20	12,16	10,75	5,08
	1,7	21,00	14,01	11,60	5,17	14,35	13,23	5,70
	1,8	23,44	17,24	16,78	7,96	16,01	16,29	5,52
	1,9	25,95	20,32	21,28	10,45	15,44	18,69	5,93
	2,0	30,81	21,45	28,20	11,35	20,60	22,48	7,59
	2,1	32,71	23,10	31,45	15,47	24,60	25,47	6,97
	2,2	36,85	25,43	33,94	21,14	29,22	29,32	6,33
	2,3	35,51	25,74	37,26	25,01	33,92	31,49	5,71
	2,4	40,25	30,00	38,71	26,72	40,61	35,26	6,45
	2,5	45,38	31,48	39,40	32,61	42,14	38,20	6,02
	2,6	45,58	31,65	43,56	37,99	46,17	40,99	6,14
	2,7	45,55	37,42	45,45	41,24	48,92	43,72	4,45
	2,8	48,98	34,64	50,17	43,00	51,20	45,60	6,90
	2,9	44,17	38,93	50,81	48,06	53,96	47,19	5,86
	3,0	49,75	40,58	51,34	48,10	53,04	48,56	4,82
	3,1	48,89	42,67	54,75	49,83	54,68	50,16	4,98
3,3	55,09	42,45	53,29	53,16	55,51	51,90	5,39	
3,6	55,34	43,66	58,33	55,93	56,15	53,88	5,83	
3,8	58,44	44,64	57,45	58,43	60,38	55,87	6,37	
4,0	61,07	47,61	59,96	61,15	62,23	58,41	6,09	
4,4	63,85	50,56	62,50	63,39	64,67	60,99	5,89	
4,6	65,71	55,06	57,95	64,70	68,09	62,30	5,53	
4,8	67,41	54,60	65,39	65,96	70,61	64,80	6,05	
5,0	66,17	58,08	70,62	69,83	70,77	67,09	5,38	
5,4	72,72	60,56	72,58	70,38	71,31	69,51	5,10	
5,8	77,18	62,21	71,52	74,03	73,01	71,59	5,64	
6,0	75,55	63,00	75,67	73,92	74,11	72,45	5,34	
6,2	78,03	62,33	79,16	73,02	74,85	73,48	6,70	
6,4	76,02	67,63	75,64	76,48	77,67	74,69	4,02	
6,6	77,53	69,56	76,35	77,93	79,49	76,17	3,86	
6,8	80,77	66,56	77,40	79,76	80,41	76,98	5,97	
7,0	81,12	71,16	79,07	80,29	78,17	77,96	3,97	
7,5	83,07	70,92	79,54	81,91	81,22	79,33	4,88	

Rauheit	\bar{u} an der Messposition							$\sigma_{\bar{u}}$
	z	a	b	c	d	e	$\langle \bar{u} \rangle$	
	[cm]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]
Fortsetzung RI-4	8,0	82,84	73,07	80,85	80,68	83,92	80,27	4,25
	8,5	85,67	74,59	84,95	82,69	84,67	82,52	4,57
	9,0	89,73	76,40	84,21	85,06	87,47	84,57	5,05
	9,5	89,37	80,14	86,56	85,37	87,43	85,78	3,47
	10,0	90,56	80,63	88,55	87,80	88,62	87,23	3,83
	10,5	91,79	82,81	90,05	88,71	90,46	88,76	3,51
	11,0	92,26	84,96	89,07	88,46	92,15	89,38	3,02
	11,5	92,72	84,94	89,42	89,66	93,37	90,02	3,35
	12,0	94,07	87,72	91,82	88,13	92,81	90,91	2,84
	12,5	93,57	86,45	92,67	89,94	93,84	91,29	3,12
	13,0	96,40	87,70	95,05	87,67	94,20	92,21	4,20
	13,5	97,79	87,78	93,81	89,54	94,70	92,72	4,04
	14,0	96,84	89,35	95,29	88,10	95,36	92,99	3,96
	14,5	97,18	91,98	96,21	88,11	96,39	93,97	3,86

RI-5	0,1	-2,65	-4,38	-6,51	-4,71	-1,96	-4,04	1,80
	0,2	-4,66	-4,04	-3,95	-4,56	-5,07	-4,46	0,46
	0,3	-8,74	-8,96	-4,60	-5,23	-4,47	-6,40	2,25
	0,4	-5,92	-7,09	-7,15	-2,76	-1,99	-4,98	2,45
	0,5	-8,59	-4,73	-6,22	-7,07	-6,45	-6,61	1,40
	0,6	-8,43	0,68	-6,28	-5,24	-4,42	-4,74	3,38
	0,7	-7,47	-1,75	-4,99	-1,94	-4,37	-4,11	2,37
	0,8	-6,32	-1,93	-6,87	-1,92	-4,25	-4,26	2,34
	0,9	-6,38	-1,60	-7,16	-2,47	-3,50	-4,22	2,44
	1,0	-6,87	-1,46	-4,42	-0,88	0,39	-2,65	2,94
	1,1	-4,38	0,48	-2,37	0,42	0,38	-1,09	2,20
	1,2	-3,57	1,81	-1,45	3,75	2,22	0,55	2,98
	1,3	-1,69	3,78	-0,57	4,01	6,45	2,39	3,41
	1,4	1,28	7,67	2,47	5,97	6,61	4,80	2,77
	1,5	3,52	12,28	4,65	6,87	9,45	7,35	3,57
	1,6	7,94	16,41	7,24	9,90	9,02	10,10	3,67
	1,7	13,29	20,56	10,96	12,25	13,55	14,12	3,74
	1,8	14,54	26,20	13,39	14,16	14,09	16,48	5,45
	1,9	16,58	28,85	12,62	17,55	14,53	18,03	6,34
	2,0	24,38	29,84	18,89	21,23	16,08	22,08	5,30
	2,1	22,70	32,93	22,52	23,80	20,11	24,41	4,95
	2,2	24,28	38,49	24,92	26,97	22,25	27,38	6,43
	2,3	29,98	38,72	29,14	32,06	24,48	30,88	5,19
	2,5	32,27	40,88	30,72	39,43	32,45	35,15	4,65
	2,6	35,62	45,71	34,09	42,18	34,29	38,38	5,27
	2,7	36,59	45,15	37,65	49,40	34,83	40,73	6,25
	2,8	40,49	45,88	37,15	53,56	38,82	43,18	6,66
	3,0	41,15	51,11	39,20	54,80	41,06	45,46	7,00
	3,3	42,11	56,75	45,04	58,71	42,18	48,95	8,12
	3,4	43,45	57,77	43,56	59,70	43,54	49,60	8,37
	3,6	44,68	59,62	47,05	60,20	47,09	51,73	7,54
	4,4	48,11	64,64	53,25	66,84	51,99	56,97	8,27
4,6	49,63	66,77	55,89	67,43	50,64	58,07	8,58	
5,0	55,79	69,94	52,86	67,87	53,61	60,01	8,22	
5,2	55,20	71,98	53,85	69,12	56,76	61,38	8,49	
5,6	57,99	72,72	56,00	72,49	58,58	63,56	8,32	
5,8	60,30	73,05	58,90	70,84	58,72	64,36	6,99	
6,4	65,12	77,25	62,86	74,01	60,29	67,91	7,35	
6,8	67,13	78,26	62,71	75,56	65,56	69,85	6,71	

Rauheit	\bar{u} an der Messposition							
	z	a	b	c	d	e	$\langle \bar{u} \rangle$	$\sigma_{\bar{u}}$
	[cm]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]
Fortsetzung RI-5	7,5	67,60	79,73	70,74	76,20	67,18	72,29	5,50
	8,5	72,14	81,11	70,60	77,00	69,17	74,00	4,95
	9,0	70,17	81,33	72,55	79,61	72,79	75,29	4,88
	9,5	73,65	83,60	75,07	79,03	73,09	76,89	4,41
	10,0	75,44	84,49	74,91	79,07	75,71	77,92	4,02
	10,5	77,94	84,32	77,92	81,16	74,06	79,08	3,86
	11,0	76,36	85,64	77,83	80,29	76,74	79,37	3,82
	11,5	78,90	83,93	80,04	81,93	79,20	80,80	2,11
	12,0	82,39	86,04	83,60	81,61	80,37	82,80	2,16
	12,5	81,37	86,98	82,57	82,63	83,96	83,50	2,15
	13,0	85,79	86,48	83,51	82,94	82,17	84,18	1,87
	14,0	86,17	89,01	83,71	84,51	84,79	85,64	2,08
	14,5	86,40	89,64	86,29	85,09	84,90	86,47	1,90
	15,5	87,81	90,50	88,33	85,48	85,88	87,60	2,03
	16,0	88,28	91,18	91,19	84,56	88,36	88,71	2,73
	16,5	87,28	91,64	91,65	86,51	89,40	89,29	2,39
	17,5	89,37	91,25	93,01	86,96	90,51	90,22	2,25
18,0	90,84	92,50	93,24	88,03	90,24	90,97	2,04	
18,5	90,66	91,87	94,26	86,98	92,46	91,25	2,71	

RII-1	0,1	-4,88	-4,33	-4,25	-4,82	-4,86	-4,62	0,31
	0,2	-5,77		-7,75	-11,82	-5,01	-7,59	3,05
	0,3	-7,02	-7,93	-9,15	-11,06	-8,38	-8,71	1,52
	0,4	-10,26	-4,49	-5,01	-5,89	-3,95	-5,92	2,53
	0,5	-3,90		-11,81	-8,87	-5,11	-7,42	3,61
	0,6	-1,12	-4,24	-6,65	-6,20	-5,56	-4,75	2,23
	0,7	9,21	-4,72	-0,06	-4,10	-1,72	-0,28	5,63
	0,8	1,96	0,79	-0,80	-4,66	4,21	0,30	3,32
	0,9	6,23	-3,53	-6,16	-4,86	8,94	0,12	6,94
	1,0	3,06	-3,53	-0,82	-4,52	9,53	0,74	5,72
	1,1	8,30	-2,83	-1,50	-6,65	11,57	1,78	7,77
	1,2	8,16	0,12	-3,28	-2,59	8,20	2,12	5,68
	1,3	7,50	0,04	0,33	-4,52	13,86	3,44	7,24
	1,4	11,58	0,64	1,03	-6,62	12,48	3,82	8,10
	1,5	11,85	0,78	2,84	-3,20	15,24	5,50	7,75
	1,7	14,05	3,38	5,91	-1,16	15,98	7,63	7,23
	1,8	18,49	5,55	9,63	1,21	18,46	10,67	7,72
	1,9	19,53	4,87	12,46	3,91	18,72	11,90	7,39
	2,0	20,48	5,97	14,51	6,67	21,09	13,74	7,26
	2,1	23,08	9,03	18,82	7,93	23,60	16,49	7,56
	2,2	25,45	9,90	24,34	13,17	22,58	19,09	7,07
	2,3	25,91	13,56	24,30	16,68	25,91	21,27	5,76
	2,4	26,33	16,08	28,98	18,30	28,82	23,70	6,09
	2,5	28,60	12,86	31,19	23,91	28,61	25,03	7,30
	2,6	31,62	17,13	31,05	23,82	31,42	27,01	6,42
	2,8	32,49	17,44	33,79	25,68	34,17	28,72	7,18
	2,9	31,12	20,70	36,05	26,85	32,53	29,45	5,90
	3,0	32,88	22,88	35,56	29,43	35,50	31,25	5,31
	3,1	36,28	21,60	38,71	30,95	34,56	32,42	6,67
	3,2	40,53	23,34	41,37	31,81	38,42	35,09	7,56
	3,4	41,01	26,32	41,70	31,25	39,34	35,93	6,80
	3,5	41,05	26,94	41,49	32,81	43,36	37,13	6,99
	3,6	43,42	27,49	44,36	33,43	39,62	37,66	7,13
3,8	45,43	31,42	46,42	33,68	46,26	40,64	7,44	

Rauheit	\bar{u} an der Messposition							$\sigma_{\bar{u}}$
	z	a	b	c	d	e	$\langle \bar{u} \rangle$	
	[cm]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]
Fortsetzung RII-1	4,0	49,01	33,30	48,98	33,81	45,71	42,16	7,97
	4,2	49,50	32,74	49,26	37,67	46,78	43,19	7,57
	4,4	52,06	34,37	50,65	36,83	47,56	44,29	8,15
	4,6	52,77	38,46	53,25	38,85	48,26	46,32	7,26
	4,8	54,72	36,85	53,94	41,43	50,18	47,42	7,92
	5,0	55,92	38,23	56,24	43,56	51,31	49,05	7,93

RII-2	0,1	-5,41	-4,92	-4,42	-4,47	-4,60	-4,76	0,41
	0,2	-4,29	-3,10	-4,01	-4,37	-3,91	-3,94	0,50
	0,3	-6,91	-3,81	-3,32	-7,83	-5,64	-5,50	1,94
	0,4	-4,12	-10,13	-7,59	-4,33		-6,54	2,87
	0,5	-3,69	-0,54	-6,23	-5,16		-3,91	2,47
	0,6	3,86	-0,27	-2,46	-7,42	8,94	0,53	6,22
	0,7	7,42	-1,39	-2,54	-8,48	9,56	0,92	7,46
	0,8	5,71	-2,32	-3,59	-7,45	6,85	-0,16	6,19
	0,9	8,03	-2,91	-3,31	-7,44	12,88	1,45	8,58
	1,0	7,19	-0,89	-2,74	-7,61	10,02	1,19	7,27
	1,1	7,91	-1,60	-2,20	-7,16	12,60	1,91	8,09
	1,2	10,69	-0,16	-1,19	-5,88	9,33	2,56	7,15
	1,3	13,98	0,39	0,21	-7,28	13,70	4,20	9,33
	1,5	15,36	1,33	2,88	-5,15	16,21	6,13	9,32
	1,6	17,97	5,43	6,42	-3,15	16,35	8,60	8,67
	1,7	20,79	4,35	8,87	-1,38	20,51	10,63	9,84
	1,8	17,67	7,45	12,30	1,35	19,97	11,74	7,58
	1,9	24,11	9,82	16,14	5,12	21,77	15,39	7,96
	2,0	23,78	12,60	18,00	10,38	21,99	17,35	5,80
	2,1	24,04	11,96	22,73	15,45	24,10	19,65	5,60
	2,2	26,34	14,49	27,36	21,44	25,49	23,03	5,27
	2,4	27,72	15,90	32,02	27,74	31,17	26,91	6,46
	2,5	31,65	18,05	31,32	29,77	30,09	28,18	5,72
	2,6	32,75	17,79	32,88	32,92	30,44	29,35	6,55
	2,7	32,76	22,56	34,22	35,74	31,57	31,37	5,17
	2,8	34,79	24,41	38,23	36,28	37,78	34,30	5,69
	2,9	34,57	26,78	40,67	35,63	38,17	35,16	5,25
	3,1	42,56	30,42	39,45	38,68	40,37	38,30	4,64
	3,3	45,50	29,86	43,45	38,94	43,06	40,16	6,23
	3,5	45,70	32,26	45,55	42,70	42,27	41,70	5,51
	3,6	45,64	33,03	46,58	45,72	42,69	42,73	5,62
	3,8	50,15	38,08	49,54	43,76	44,47	45,20	4,92
	4,2	50,61	39,52	52,40	49,17	46,58	47,66	5,02
	4,4	53,50	39,84	54,06	50,32	48,47	49,24	5,73
	4,6	55,75	41,49	54,33	51,77	51,20	50,91	5,58
	5,0	56,56	45,15	57,20	53,35	54,18	53,29	4,82
	5,2	58,29	47,17	56,45	55,28	55,15	54,47	4,27
	5,4	60,62	49,08	60,11	54,92	58,01	56,55	4,74
	5,6	61,77	47,94	60,86	57,07	58,62	57,25	5,53
	5,8	64,06	49,69	60,43	58,77	60,80	58,75	5,42
	6,0	64,75	54,04	62,49	59,66	58,19	59,83	4,11
	6,4	64,59	54,07	64,46	61,77	63,46	61,67	4,40
	6,8	65,89	55,04	65,85	62,95	63,43	62,63	4,45
	7,0	67,03	55,88	65,51	63,44	63,81	63,13	4,30

Rauheit	\bar{u} an der Messposition							
	z	a	b	c	d	e	$\langle \bar{u} \rangle$	$\sigma_{\bar{u}}$
	[cm]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]
R11-3	0,1	2,79	-5,15	-3,31	-8,65	-5,28	-3,92	4,22
	0,2	-5,77	-4,03	-4,27	-3,75	-4,30	-4,42	0,79
	0,3	-9,13	-3,42	-5,32	-4,97	-4,60	-5,49	2,16
	0,4	-4,54	-5,60	1,08	-5,22	-6,14	-4,09	2,95
	0,5	-4,53	-2,51	3,17	-5,50	8,78	-0,12	6,00
	0,6	4,17	-3,10	-2,25	-6,89	14,73	1,33	8,48
	0,7	9,71	-2,05	-0,60	-8,39	14,07	2,55	9,15
	0,8	9,77	1,16	0,25	-6,57	12,12	3,34	7,60
	1,0	14,83	-1,87	-0,41	-6,70	13,93	3,96	9,80
	1,1	14,79	-0,28	2,55	-6,03	15,70	5,34	9,55
	1,2	13,11	3,07	1,55	-4,44	17,20	6,10	8,85
	1,4	19,36	4,94	6,60	-5,47	16,22	8,33	9,86
	1,5	18,95	6,18	7,09	-2,98	18,87	9,62	9,35
	1,6	21,51	8,76	11,66	-2,50	21,29	12,14	9,97
	1,7	19,88	12,48	14,38	1,21	21,79	13,95	8,08
	1,8	21,70	14,17	16,98	7,70	26,16	17,34	7,07
	1,9	25,26	19,14	24,81	7,82	26,71	20,75	7,78
	2,0	26,04	21,02	27,91	14,76	28,49	23,64	5,77
	2,1	26,49	22,76	26,97	21,59	29,86	25,54	3,35
	2,2	25,75	29,09	30,19	29,01	32,52	29,31	2,45
	2,3	29,33	25,43	34,63	33,63	35,57	31,72	4,25
	2,4	31,56	30,09	37,25	35,76	34,32	33,79	2,95
	2,5	32,71	32,93	40,36	41,99	36,78	36,95	4,22
	2,6	35,73	33,22	43,68	43,50	38,49	38,92	4,65
	3,0	34,67	39,26	42,14	47,96	45,79	41,96	5,27
	3,1	39,01	41,57	42,16	51,52	43,21	43,49	4,75
	3,2	39,30	40,68	47,69	51,20	46,56	45,09	4,98
	3,3	41,40	42,41	45,83	53,29	46,39	45,86	4,67
	3,4	42,08	43,80	48,85	51,95	46,55	46,65	3,94
	3,5	44,03	49,32	50,82	54,30	45,42	48,78	4,15
	3,6	45,10	48,82	51,53	53,49	49,97	49,78	3,15
	3,8	48,72	50,87	52,40	54,87	50,43	51,46	2,32
	4,0	49,24	54,40	52,74	58,65	51,32	53,27	3,56
	4,2	52,03	55,30	55,59	57,46	53,32	54,74	2,11
	4,6	56,25	59,47	57,66	60,36	55,65	57,88	2,02
	4,8	56,82	60,26	57,88	63,27	59,29	59,50	2,48
5,0	57,36	63,62	62,23	63,78	57,04	60,81	3,35	
5,6	63,28	62,46	65,66	67,39	64,08	64,57	1,97	
6,0	66,07	67,71	67,39	67,36	63,08	66,32	1,92	
6,2	68,32	66,21	65,36	68,10	65,19	66,64	1,49	
6,4	71,18	68,61	68,56	69,65	67,15	69,03	1,49	
6,6	70,45	69,92	70,21	69,69	67,86	69,63	1,03	
7,0	73,40	70,14	72,72	71,10	72,67	72,01	1,34	
7,5	74,45	74,30	74,00	73,16	71,67	73,52	1,14	
8,0	74,45	75,08	76,31	73,80	72,15	74,36	1,54	
9,0	81,03	77,87	80,32	75,70	76,46	78,28	2,34	
9,5	80,72	77,38	81,06	76,70	79,78	79,13	1,98	
10,0	82,00	79,32	83,78	76,75	81,08	80,59	2,68	
10,5	84,17	78,35	81,98	77,90	81,83	80,85	2,65	
11,0	83,30	78,48	82,74	77,20	82,67	80,88	2,82	
11,5	84,15	79,09	82,67	77,65	82,68	81,25	2,74	

Rauheit	\bar{u} an der Messposition							
	z	a	b	c	d	e	$\langle \bar{u} \rangle$	$\sigma_{\bar{u}}$
	[cm]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]
R11-4	0,1		-3,00	-8,30	-5,76	-8,45	-6,38	2,57
	0,2	-5,41	-4,28	-4,57	-5,32	-4,42	-4,80	0,53
	0,3	-7,19	-8,09	-3,23	-3,78	-4,15	-5,29	2,20
	0,4	-4,53	-5,77	-3,51	-4,64	-7,56	-5,20	1,54
	0,5	-4,60	-6,55	-4,42	-5,61	12,49	-1,74	8,00
	0,6	7,19	-3,57	1,36	-2,29	14,34	3,41	7,40
	0,7	10,03	-0,67	1,23	-3,12	11,47	3,79	6,56
	0,8	10,95	-0,39	2,00	-3,59	12,43	4,28	7,07
	1,0	12,97	-0,89	-0,04	-4,20	16,12	4,79	9,11
	1,1	17,56	0,63	0,85	-5,03	15,74	5,95	10,07
	1,2	15,59	3,25	2,45	-3,07	18,79	7,40	9,33
	1,3	18,22	4,87	4,35	-2,39	20,94	9,20	9,95
	1,4	23,17	5,37	4,82	-2,70	18,83	9,90	10,74
	1,5	21,58	7,48	10,01	-1,14	20,63	11,71	9,53
	1,6	25,22	11,00	10,93	2,56	20,39	14,02	8,89
	1,7	27,09	15,45	12,89	6,02	23,68	17,02	8,46
	1,8	28,60	19,76	15,33	7,16	23,73	18,92	8,20
	1,9	27,44	19,98	21,59	13,87	30,12	22,60	6,40
	2,0	31,95	24,09	24,55	20,48	27,41	25,70	4,28
	2,1	29,13	24,01	26,82	27,79	32,72	28,09	3,20
	2,2	31,82	27,25	33,87	31,62	35,43	32,00	3,08
	2,3	33,90	29,84	36,87	40,41	35,36	35,27	3,88
	2,4	33,76	30,09	37,05	43,03	39,92	36,77	5,07
	2,6	35,41	36,44	39,99	51,27	40,13	40,65	6,30
	2,8	38,86	41,27	41,23	57,53	39,46	43,67	7,82
	3,0	43,72	41,23	44,68	56,89	45,32	46,37	6,08
	3,1	46,10	40,10	49,02	57,38	50,86	48,69	6,34
	3,2	44,79	44,36	52,72	60,54	47,69	50,02	6,76
	3,3	45,47	48,95	51,57	60,13	52,93	51,81	5,45
	3,5	48,53	51,46	53,62	61,01	52,43	53,41	4,65
	4,0	56,98	54,15	58,66	63,87	54,72	57,67	3,90
	4,4	58,03	57,04	61,81	68,43	64,08	61,88	4,64
	5,0	65,30	64,89	63,35	71,30	63,48	65,66	3,26
6,0	69,41	70,45	71,76	75,17	73,21	72,00	2,27	
6,6	74,19	73,07	71,76	74,63	77,35	74,20	2,08	
6,8	76,18	72,03	75,73	77,96	72,34	74,85	2,57	
7,0	77,79	75,82	73,38	76,35	75,53	75,78	1,60	
7,5	77,22	72,87	80,48	79,25	75,76	77,12	2,99	
8,0	82,14	75,54	81,13	82,21	79,72	80,15	2,77	
8,5	83,47	80,82	84,10	80,39	80,82	81,92	1,72	
9,0	85,95	79,08	82,32	83,16	83,70	82,84	2,50	
9,5	84,97	83,22	86,79	83,26	87,24	85,09	1,90	
10,0	87,76	84,41	87,42	82,94	84,54	85,41	2,09	
10,5	89,12	85,29	88,27	82,63	86,27	86,32	2,57	
11,0	88,52	85,63	88,47	83,61	87,67	86,78	2,13	
11,5	90,63	86,74	89,76	83,46	88,64	87,84	2,85	
12,0	90,85	85,88	91,64	84,96	89,66	88,60	3,00	
12,5	91,02	88,73	92,34	83,41	90,02	89,10	3,45	
13,0	91,56	85,89	90,28	84,15	90,15	88,41	3,20	
13,5	91,68	85,75	91,29	82,78	90,45	88,39	3,94	
14,0	91,18	87,01	91,50	82,91	89,07	88,34	3,53	
14,5	91,70	86,28	90,19	82,61	89,25	88,01	3,61	
15,0	91,52	85,89	91,11	81,60	88,78	87,78	4,12	

Rauheit	\bar{u} an der Messposition							
	z	a	b	c	d	e	$\langle \bar{u} \rangle$	$\sigma_{\bar{u}}$
	[cm]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]
R11-5	0,1		-0,95	-6,47		-4,28	-3,90	2,78
	0,2	-5,61	-3,67	-3,83	-4,69	-4,08	-4,37	0,79
	0,3	-4,66	-4,79	-2,49	-4,69	-4,42	-4,21	0,97
	0,4	-6,35	0,15	-4,73	-13,19	-7,21	-6,27	4,80
	0,5		-3,20	3,14	-6,34	9,03	0,66	6,83
	0,6	8,96	-3,85	-0,71	-2,84	9,24	2,16	6,44
	0,7	7,42	-0,98	-0,78	-2,95	12,12	2,97	6,49
	0,8	10,28	-0,42	0,71	-6,82	11,92	3,14	7,84
	0,9	8,35	-1,52	0,60	-5,31	16,23	3,67	8,61
	1,1	12,35	0,42	2,94	-5,95	13,79	4,71	8,31
	1,2	13,45	1,11	3,54	-4,05	18,02	6,41	9,08
	1,3	18,01	1,97	4,21	-5,16	14,81	6,77	9,52
	1,4	17,74	3,32	4,36	-3,55	18,73	8,12	9,73
	1,5	19,41	7,62	5,84	-2,00	20,14	10,20	9,46
	1,6	22,58	7,24	10,17	1,42	20,07	12,30	8,87
	1,7	23,63	12,57	12,67	2,62	20,76	14,45	8,22
	1,8	24,55	18,35	15,53	7,66	21,31	17,48	6,44
	1,9	24,74	21,77	18,30	13,79	26,76	21,07	5,17
	2,0	27,75	26,54	23,62	16,45	28,07	24,49	4,82
	2,1	27,45	27,39	24,27	26,96	27,91	26,80	1,45
	2,2	27,91	29,69	27,29	38,76	29,48	30,63	4,66
	2,3	31,26	25,39	32,58	41,61	31,57	32,48	5,83
	2,4	35,12	31,83	34,78	44,07	34,15	35,99	4,70
	2,5	33,28	35,09	34,37	49,92	34,66	37,46	7,00
	2,6	34,68	38,15	36,21	51,41	35,44	39,18	6,96
	2,7	35,27	39,84	34,52	50,54	40,15	40,06	6,40
	2,8	33,91	43,61	38,57	54,49	38,11	41,74	7,91
	2,9	37,64	38,73	40,99	55,57	40,95	42,78	7,30
	3,0	39,06	41,11	39,90	58,19	43,31	44,31	7,92
	3,1	43,99	42,43	40,81	55,00	43,62	45,17	5,63
	3,2	42,21	49,28	42,97	57,56	45,14	47,43	6,29
	3,3	42,18	45,23	48,07	58,72	49,25	48,69	6,24
	3,6	47,57	50,96	51,07	60,90	49,03	51,91	5,23
3,8	47,85	56,81	49,48	65,71	52,56	54,48	7,15	
4,4	52,63	60,22	54,41	66,59	54,44	57,66	5,76	
4,6	56,60	60,64	58,08	68,73	55,22	59,85	5,35	
5,0	60,84	64,92	59,26	66,81	57,72	61,91	3,84	
5,2	60,19	66,68	63,43	70,11	60,56	64,19	4,21	
5,4	62,10	65,90	63,79	70,37	63,26	65,08	3,26	
6,0	66,52	68,08	65,15	72,96	65,59	67,66	3,17	
6,4	68,14	71,02	67,61	74,93	67,92	69,93	3,11	
6,8	69,91	74,16	69,16	75,41	68,69	71,46	3,09	
7,5	72,08	78,22	72,12	76,51	74,49	74,68	2,70	
8,0	76,27	78,84	73,89	76,72	74,75	76,09	1,91	
8,5	78,28	81,24	73,87	77,06	76,68	77,43	2,67	
9,0	79,11	82,01	77,54	78,96	74,94	78,51	2,58	
9,5	84,11	82,17	80,71	80,25	80,26	81,50	1,66	
10,0	84,30	83,22	83,61	80,09	82,80	82,81	1,61	
10,5	83,30	82,63	82,97	80,97	86,52	83,28	2,02	
11,0	84,99	85,21	85,91	82,44	85,96	84,90	1,44	
11,5	87,70	89,14	88,11	81,70	86,04	86,54	2,92	
12,0	89,05	88,26	87,03	83,05	86,44	86,77	2,32	
12,5	88,46	87,61	89,99	82,97	89,67	87,74	2,83	
13,0	90,03	88,38	92,21	82,63	89,71	88,59	3,61	

Rauheit	\bar{u} an der Messposition							$\langle \bar{u} \rangle$	$\sigma_{\bar{u}}$
	z	a	b	c	d	e	[cm/s]		
	[cm]	[cm/s]							
Fortsetzung RII-5	13,5	91,57	90,55	92,83	82,96	91,77	89,93	3,98	
	14,0	93,00	89,40	93,50	82,82	93,37	90,42	4,57	
	14,5	93,32	90,17	93,89	84,80	94,17	91,27	3,96	
	15,0	95,65	91,00	93,29	82,79	92,29	91,00	4,90	
	15,5	95,60	91,09	95,49	83,94	97,02	92,63	5,34	
	16,0	97,41	91,53	95,85	85,27	96,16	93,24	4,98	
	16,5	95,94	91,23	96,01	84,24	95,63	92,61	5,09	
	17,0	96,66	90,48	96,03	86,07	96,03	93,05	4,64	
	17,5	97,04	90,13	97,37	83,13	95,97	92,73	6,12	
	18,0	97,12	89,70	96,56	83,16	96,70	92,65	6,13	
	18,5	97,33	88,47	96,92	83,60	96,34	92,54	6,19	
19,0		89,54	96,93	82,09	97,28	91,46	7,19		

RIII-1	0,1	-5,76	-3,21	-4,07	-4,93	-5,55	-4,70	1,06
	0,2	-4,33	-3,97	-4,36	-10,41	-4,15	-5,44	2,78
	0,3	-9,50	-3,73	-3,19	-10,01	-7,71	-6,83	3,20
	0,4	-4,41	-4,00	-4,52	-5,64	-4,84	-4,68	0,62
	0,5	-1,10	-4,47	-1,48	-12,38	2,84	-3,32	5,70
	0,6	-2,12	-3,42	-3,02	-7,24	2,94	-2,57	3,65
	0,7	-1,92	-2,46	-4,50	-7,87	4,21	-2,51	4,42
	0,8	0,06	-3,36	-0,53	-7,10	3,17	-1,55	3,87
	1,0	0,46	-2,69	-1,30	-4,72	2,40	-1,17	2,76
	1,1	1,51	-0,73	-2,59	-3,29	4,12	-0,20	3,05
	1,2	1,23	-0,30	-0,81	-3,64	5,02	0,30	3,17
	1,4	4,75	-0,28	-1,10	-0,02	5,38	1,75	3,06
	1,5	4,32	2,98	-0,23	0,46	5,08	2,52	2,33
	1,6	5,42	4,15	2,00	2,88	4,00	3,69	1,31
	1,8	7,24	7,79	3,45	5,10	3,78	5,47	1,98
	1,9	8,03	6,82	7,36	6,13	4,08	6,48	1,51
	2,0	10,19	10,46	8,14	11,29	2,54	8,53	3,54
	2,1	11,16	10,26	11,36	12,67	4,30	9,95	3,27
	2,2	12,22	10,54	12,16	13,02	4,41	10,47	3,51
	2,3	14,54	11,15	13,30	15,59	3,47	11,61	4,84
	2,4	14,90	12,66	17,05	15,05	4,29	12,79	5,00
	2,5	16,03	12,90	16,94	16,60	4,13	13,32	5,38
	2,7	18,03	15,87	20,66	19,82	4,56	15,79	6,54
	2,8	18,99	17,35	20,83	19,16	7,09	16,68	5,50
	2,9	22,23	17,04	21,77	21,74	7,27	18,01	6,37
	3,0	21,84	20,68	23,62	23,10	7,87	19,42	6,56
	3,1	24,31	18,78	25,18	24,90	10,87	20,81	6,15
	3,4	26,67	23,93	29,04	26,34	13,83	23,96	5,95
	3,5	26,98	23,20	30,36	31,71	16,42	25,73	6,16
	3,6	28,62	25,00	31,92	30,08	18,27	26,78	5,39
	3,8	32,22	26,17	31,22	33,95	21,17	28,95	5,22
4,0	35,98	28,98	34,18	36,63	24,36	32,03	5,23	
4,2	37,25	31,42	33,43	37,54	27,09	33,35	4,35	
4,4	42,72	34,23	36,59	40,45	31,56	37,11	4,53	
4,6	44,78	37,11	39,29	42,70	33,37	39,45	4,51	
4,8	48,70	36,74	40,81	44,78	35,67	41,34	5,47	
5,0	49,16	39,05	42,41	46,33	40,57	43,50	4,17	

Rauheit	\bar{u} an der Messposition							$\langle \bar{u} \rangle$	$\sigma_{\bar{u}}$
	z	a	b	c	d	e			
	[cm]	[cm/s]	[cm/s]						
RIII-2	0,1	-4,82	-4,31	-4,03	-4,37	-5,77	-4,66	0,68	
	0,2	-4,95			-4,10	-3,53	-4,19	0,71	
	0,3	-9,94	-7,70	-10,27	-10,02	-10,10	-9,61	1,07	
	0,4	-7,92	-5,62	-5,54	-4,81	-4,79	-5,74	1,28	
	0,5	-5,62	-4,35	-4,99	-5,36	-6,05	-5,27	0,65	
	0,6	-2,30	1,92	-3,49	-9,69	2,47	-2,22	4,92	
	0,7	-2,53	-0,50	-5,05	-9,18	-0,96	-3,65	3,57	
	0,8	0,54	-2,47	-3,41	-8,12	5,33	-1,63	4,98	
	0,9	-0,28	-3,16	-3,00	-4,57	4,53	-1,30	3,61	
	1,0	2,22	-1,97	-0,60	-6,79	3,19	-0,79	3,95	
	1,1	0,76	2,71	-2,22	-5,28	4,26	0,04	3,84	
	1,3	3,45	0,20	-1,62	-1,62	2,60	0,60	2,35	
	1,5	0,67	3,40	1,13	-1,42	3,15	1,39	1,97	
	1,6	3,50	5,07	1,33	-1,17	4,10	2,57	2,50	
	1,8	4,20	9,21	4,97	5,72	1,19	5,06	2,89	
	2,0	8,23	10,37	8,31	10,50	3,57	8,20	2,80	
	2,1	10,19	13,63	9,79	12,32	3,67	9,92	3,83	
	2,2	12,57	16,14	11,76	17,49	3,12	12,22	5,62	
	2,3	14,40	16,79	12,77	16,68	2,81	12,69	5,77	
	2,4	14,58	17,15	14,15	18,28	2,16	13,26	6,44	
	2,5	16,90	19,43	17,90	20,16	1,23	15,12	7,87	
	2,6	18,42	19,15	16,86	19,70	6,33	16,09	5,56	
	2,9	22,49	21,42	20,61	22,61	6,46	18,72	6,90	
	3,0	19,81	23,20	22,93	26,17	8,06	20,04	7,06	
	3,1	25,01	23,42	23,78	25,57	9,43	21,44	6,77	
	3,2	25,12	25,23	25,09	29,43	11,88	23,35	6,67	
	3,3	25,00	29,20	23,05	29,79	15,00	24,41	5,97	
	3,4	28,11	29,78	27,25	30,45	15,26	26,17	6,23	
	3,6	31,50	30,78	26,60	32,93	17,20	27,80	6,38	
	3,8	31,44	30,26	30,53	33,01	20,46	29,14	4,97	
4,0	35,22	31,86	31,50	37,54	23,06	31,84	5,50		
4,2	40,24	37,32	34,51	41,43	25,89	35,88	6,20		
4,4	40,52	40,18	35,46	43,68	32,14	38,40	4,56		
4,8	45,56	39,76	38,32	47,61	38,17	41,89	4,40		
5,0	47,73	42,97	42,45	47,24	37,29	43,54	4,24		
5,2	51,64	46,32	44,14	49,17	39,75	46,20	4,59		
5,6	52,86	50,64	50,80	51,22	45,37	50,18	2,83		
5,8	55,83	48,09	50,26	53,86	47,55	51,12	3,62		
6,0	56,69	51,20	49,11	54,44	46,88	51,66	3,96		
6,4	57,33	52,74	53,89	55,91	51,31	54,24	2,41		
6,6	58,50	53,24	55,65	56,42	53,80	55,52	2,11		
6,8	59,60	54,26	58,29	57,34	52,44	56,38	2,96		
7,0	60,51	54,59	58,82	57,91	54,98	57,36	2,54		
RIII-3	0,1	-11,31	-4,81	-5,69	-4,45	-5,36	-6,32	2,83	
	0,2	-5,55				-8,97	-10,51	2,54	
	0,3	-8,45	-8,20	-15,83			-8,37	3,74	
	0,4	-9,05	-5,73	-4,78	-4,86	-4,72	-5,83	1,85	
	0,5		-4,42	-6,97	-13,47	-7,39	-8,06	3,84	
	0,6	-1,06	5,10	3,56	-7,28	0,59	0,18	4,82	
	0,7	2,90	1,44	2,78	-8,24	6,13	1,00	5,45	
	0,8	3,06	-3,35	0,40	-9,76	6,46	-0,64	6,24	
	0,9	0,82	1,13	-0,23	-7,04	5,94	0,12	4,66	
	1,0	7,64	1,86	-1,43	-6,16	6,15	1,61	5,63	

Rauheit	\bar{u} an der Messposition							
	z	a	b	c	d	e	$\langle \bar{u} \rangle$	$\sigma_{\bar{u}}$
	[cm]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]
Fortsetzung RIII-3	1,2	8,47	1,16	-1,60	-1,50	5,47	2,40	4,44
	1,4	7,03	5,04	3,91	-3,50	5,53	3,60	4,12
	1,5	7,74	9,15	0,66	-0,01	8,49	5,21	4,49
	1,6	7,98	14,57	3,49	0,45	7,38	6,77	5,32
	1,7	10,48	13,68	4,39	2,62	7,52	7,74	4,48
	1,8	10,94	16,86	5,87	8,83	5,54	9,61	4,62
	1,9	12,02	20,25	8,45	10,70	7,83	11,85	4,99
	2,0	14,91	21,82	7,77	15,60	6,90	13,40	6,16
	2,1	14,68	23,34	11,74	18,70	7,44	15,18	6,14
	2,3	15,75	25,37	16,24	26,81	9,75	18,78	7,16
	2,4	20,71	29,16	16,84	28,93	7,30	20,59	9,13
	2,5	20,94	28,09	20,20	30,92	6,37	21,30	9,53
	2,6	24,42	33,35	25,03	32,56	8,33	24,74	10,06
	2,7	26,03	34,15	24,92	34,70	9,86	25,93	10,05
	2,8	27,68	33,75	29,05	35,70	11,79	27,60	9,43
	3,0	29,11	38,20	28,22	38,52	11,79	29,17	10,86
	3,1	31,03	39,89	32,13	39,87	15,09	31,60	10,13
	3,2	30,74	42,16	34,76	42,53	16,85	33,41	10,52
	3,5	33,60	44,54	40,49	46,86	24,27	37,95	9,16
	3,8	42,29	49,98	36,95	51,82	30,75	42,36	8,82
	4,0	44,52	49,26	41,05	54,66	34,03	44,70	7,86
	4,2	45,79	52,46	43,13	51,91	37,57	46,17	6,24
	4,4	50,40	55,78	42,66	56,70	43,40	49,79	6,63
	4,6	52,66	55,71	47,89	57,28	42,56	51,22	6,02
4,8	55,71	59,95	47,74	60,61	46,81	54,17	6,57	
5,0	55,23	60,43	50,81	60,99	48,01	55,09	5,74	
5,2	57,57	62,95	55,04	62,97	50,20	57,74	5,45	
5,6	61,28	63,47	56,55	63,56	55,03	59,98	3,97	
5,8	65,35	66,42	56,51	66,16	53,57	61,60	6,09	
6,0	64,15	65,50	61,18	67,41	57,51	63,15	3,89	
6,2	66,01	69,64	60,26	68,59	57,67	64,43	5,24	
6,4	67,98	68,97	62,45	68,57	58,76	65,35	4,54	
6,6	66,23	71,06	63,42	70,01	61,38	66,42	4,15	
6,8	67,27	71,63	66,16	69,96	61,48	67,30	3,90	
7,0	69,29	71,10	67,99	68,70	65,90	68,59	1,90	
7,5	72,93	73,95	74,27	72,83	69,01	72,60	2,10	
8,5	77,86	77,39	76,98	76,02	72,96	76,24	1,96	
9,0	77,60	78,62	78,84	75,78	77,40	77,65	1,22	
9,5	81,54	79,15	78,17	76,99	78,28	78,83	1,70	
10,5	81,16	77,19	80,82	77,64	80,35	79,43	1,87	
11,0	81,16	78,06	82,11	76,75	80,85	79,78	2,27	
11,5	81,89	77,95	81,28	78,51	81,89	80,30	1,92	
RIII-4	0,1	-13,23	-5,94	-5,92	-5,85	-4,55	-7,10	3,48
	0,2	-5,84	-4,74	-1,34		-4,05	-3,99	1,91
	0,3	-11,24	-5,90	-13,05	-7,38	-4,00	-8,31	3,75
	0,4	-4,59	-9,69	-8,89	-5,52	-6,70	-7,08	2,17
	0,5		-1,37			3,87	1,25	3,71
	0,6		0,53		-12,26	10,29	-0,48	11,31
	0,7		2,26	-5,80	-4,31	9,48	0,41	6,99
	0,8		2,89	-5,07	-2,93	7,38	0,57	5,65
	0,9	7,92	1,47	-3,26	-5,92	10,72	2,18	7,10
	1,0	8,85	-0,14	3,83	0,70	8,28	4,30	4,17
	1,1	6,82	3,15	4,12	2,60	8,14	4,97	2,40

Rauheit	\bar{u} an der Messposition							$\langle \bar{u} \rangle$	$\sigma_{\bar{u}}$
	z	a	b	c	d	e	[cm/s]		
	[cm]	[cm/s]							
Fortsetzung RIII-4	1,2	6,42	3,09	3,09	-0,36	8,92	4,23	3,55	
	1,3	14,26	5,16	-2,40	1,88	8,21	5,42	6,32	
	1,4	11,76	6,82	2,04	3,10	9,51	6,64	4,13	
	1,6	10,44	14,46	4,37	9,10	6,79	9,03	3,82	
	1,7	10,10	13,54	4,88	9,88	9,44	9,57	3,09	
	1,8	16,01	16,46	10,02	13,44	7,80	12,74	3,77	
	2,0	19,78	24,09	10,39	24,21	8,78	17,45	7,42	
	2,1	14,98	28,28	17,96	21,65	10,00	18,57	6,90	
	2,2	19,69	29,51	13,15	25,18	9,11	19,33	8,38	
	2,3	18,17	30,21	15,56	28,44	6,31	19,74	9,82	
	2,4	20,76	27,14	18,51	30,50	8,14	21,01	8,66	
	2,5	22,13	31,15	21,61	32,43	8,96	23,26	9,42	
	2,6	24,29	35,20	25,40	32,50	11,83	25,84	9,10	
	2,8	30,55	38,59	28,87	38,76	14,75	30,30	9,80	
	2,9	29,47	39,21	32,22	40,21	14,40	31,10	10,39	
	3,0	31,47	40,67	30,05	41,83	14,71	31,75	10,89	
	3,1	32,75	42,27	28,87	43,55	18,16	33,12	10,42	
	3,3	34,42	45,54	36,36	45,13	19,98	36,29	10,41	
	3,4	35,09	47,11	41,32	46,24	24,79	38,91	9,23	
	3,5	38,87	47,59	40,06	49,07	22,38	39,59	10,62	
	3,6	38,00	48,12	41,30	49,07	30,70	41,44	7,58	
	3,8	44,75	52,65	39,37	49,04	35,25	44,21	7,05	
	4,0	46,77	52,16	44,72	55,13	35,75	46,91	7,49	
	4,2	48,87	57,84	43,84	55,22	41,57	49,47	7,03	
	4,4	53,53	57,52	49,18	59,03	43,92	52,64	6,19	
	4,6	57,37	61,63	49,65	63,02	50,92	56,52	6,08	
	4,8	57,29	66,85	51,21	64,50	51,15	58,20	7,31	
	5,2	61,98	68,13	53,58	64,43	57,61	61,15	5,70	
	5,4	67,14	67,90	59,28	66,68	56,90	63,58	5,10	
	5,8	70,30	69,99	61,29	67,02	60,54	65,83	4,67	
6,0	69,69	73,31	65,55	69,81	61,02	67,88	4,72		
6,2	69,84	72,85	63,39	72,38	66,26	68,95	4,06		
6,4	72,77	73,41	66,98	71,00	66,31	70,10	3,28		
6,6	73,52	73,86	69,30	73,32	65,29	71,06	3,72		
6,8	75,00	77,03	69,79	71,79	65,71	71,86	4,44		
7,0	76,33	75,28	71,70	73,19	69,55	73,21	2,72		
7,5	75,67	78,02	75,04	77,26	72,40	75,68	2,18		
8,0	79,72	78,50	77,78	78,13	76,94	78,22	1,02		
8,5	83,64	79,85	82,20	77,92	77,15	80,15	2,76		
9,0	83,00	85,22	82,02	79,62	80,37	82,04	2,22		
9,5	86,65	82,13	85,14	82,50	83,23	83,93	1,91		
10,0	86,39	84,57	86,13	81,49	82,97	84,31	2,09		
10,5	88,21	85,16	87,69	84,55	87,18	86,56	1,61		
11,5	87,99	86,89	87,97	83,96	87,30	86,82	1,67		
12,0	89,92	86,91	89,73	82,75	88,45	87,55	2,94		
12,5	89,83	86,37	90,80	82,63	89,12	87,75	3,30		
13,0	88,98	86,09	89,89	82,94	88,41	87,26	2,79		
13,5	90,58	86,63	90,24	83,70	87,54	87,74	2,82		
14,0	90,33	85,18	89,71	83,97	88,09	87,45	2,79		
14,5	89,68	86,74	88,77	82,62	87,71	87,10	2,74		
15,0	88,86	84,88	88,22	82,26	87,12	86,27	2,71		

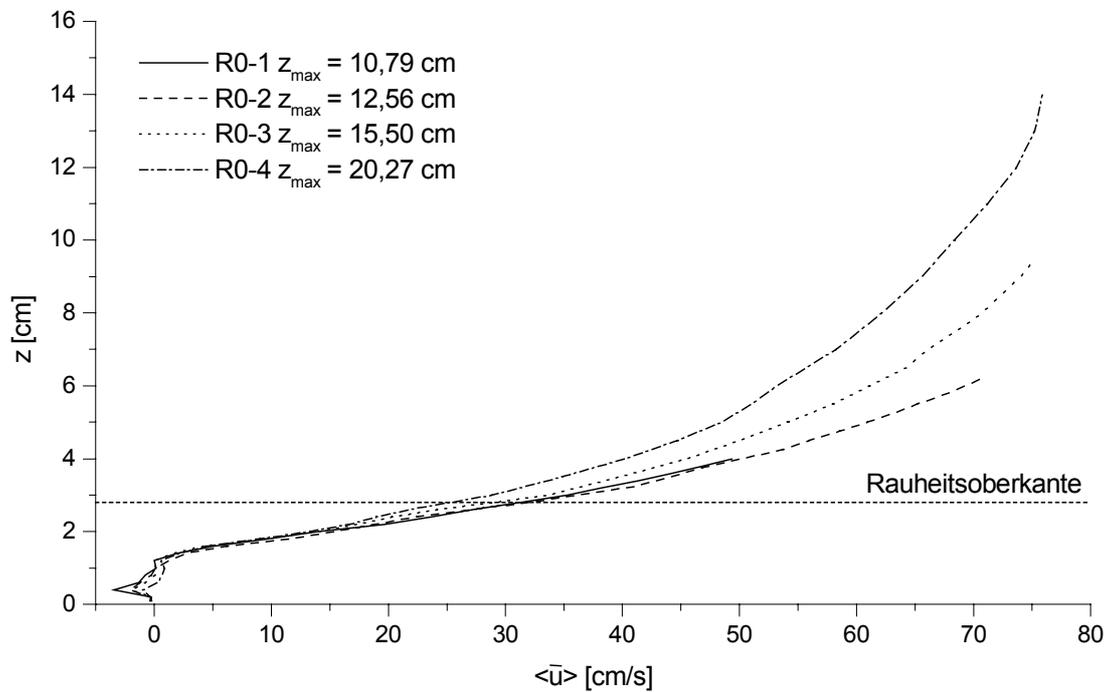
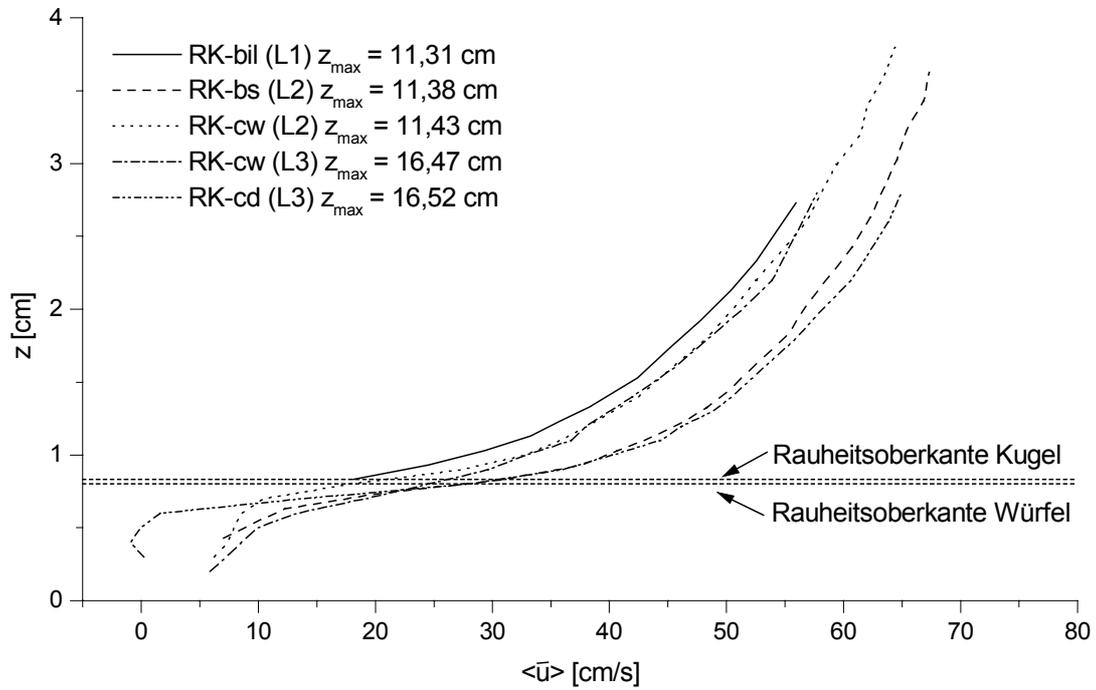
Rauheit	\bar{u} an der Messposition							
	z	a	b	c	d	e	$\langle \bar{u} \rangle$	$\sigma_{\bar{u}}$
	[cm]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]
RIII-5	0,1	-7,18	-6,46	-4,07	-7,38	-9,05	-6,83	1,81
	0,2	-4,47	-4,31	-4,31	-4,58	-6,30	-4,79	0,85
	0,3	-10,54	-3,28	-7,60	-5,02	-7,73	-6,84	2,79
	0,4	-5,47	-5,10	-2,16	-4,73	-5,14	-4,52	1,34
	0,5	-6,25	-4,92		-5,68	-3,39	-5,06	1,24
	0,6		-4,68	0,61	-10,41	-0,22	-3,67	5,06
	0,7	9,52	4,55	6,24	-3,01	7,86	5,03	4,86
	0,8	8,25	-0,04	1,77	-3,23	7,09	2,77	4,84
	0,9	5,91	-3,20	0,78	1,11	4,57	1,83	3,57
	1,0	2,66	0,25	1,83	1,01	6,03	2,36	2,24
	1,1	2,51	0,08	0,30	-0,51	4,69	1,41	2,16
	1,2	11,23	2,01	2,80	1,73	5,25	4,60	3,95
	1,3	9,88	2,99	2,67	5,33	4,25	5,02	2,91
	1,4	8,64	6,08	3,26	8,08	6,96	6,60	2,12
	1,5	10,22	12,34	2,54	6,37	6,80	7,66	3,78
	1,6	12,31	10,44	5,27	7,47	5,84	8,26	3,03
	1,7	8,79	13,28	6,37	11,16	6,49	9,22	3,00
	1,8	13,40	16,56	7,57	15,08	7,68	12,06	4,20
	1,9	11,51	19,27	10,92	19,43	7,10	13,65	5,48
	2,0	15,12	23,51	12,82	23,82	8,36	16,72	6,79
	2,2	17,24	27,34	17,41	30,78	8,87	20,32	8,77
	2,3	19,49	27,60	17,58	34,73	6,12	21,11	10,81
	2,4	19,29	28,28	20,01	35,79	11,91	23,06	9,18
	2,5	21,83	32,67	20,19	36,77	8,93	24,08	11,01
	2,6	24,20	36,43	21,36	39,66	11,72	26,68	11,42
	2,7	26,61	35,15	21,86	41,90	14,23	27,95	10,88
	2,9	22,40	41,16	24,01	45,74	15,01	29,66	13,13
	3,0	25,90	41,25	25,59	46,35	14,63	30,74	12,88
	3,1	31,23	41,07	25,79	46,73	18,09	32,58	11,51
	3,2	31,26	45,98	29,11	48,39	18,86	34,72	12,34
	3,3	32,51	42,57	29,59	50,17	22,93	35,55	10,81
	3,4	30,81	46,30	33,50	52,12	21,79	36,90	12,22
	3,5	34,42	50,68	34,48	54,72	25,47	39,95	12,28
3,6	35,95	50,04	35,18	54,67	28,33	40,83	11,05	
3,8	40,07	53,57	33,79	58,87	30,58	43,38	12,36	
4,0	43,49	53,25	39,11	61,45	33,73	46,21	11,13	
4,2	44,59	53,60	36,55	64,57	42,03	48,27	11,00	
4,4	47,56	53,57	44,75	64,90	42,67	50,69	8,94	
4,6	49,36	57,04	43,81	66,48	44,91	52,32	9,47	
4,8	51,93	63,08	44,81	67,69	50,52	55,61	9,46	
5,0	53,07	63,28	53,13	69,00	50,23	57,74	8,01	
5,4	59,27	66,13	53,17	70,07	54,26	60,58	7,38	
5,6	59,21	66,67	57,35	72,58	54,50	62,06	7,40	
6,0	65,04	68,15	58,17	72,60	55,78	63,95	6,96	
6,2	61,33	70,41	60,16	75,00	58,25	65,03	7,27	
6,4	65,71	71,47	60,94	76,15	55,08	65,87	8,33	
6,8	65,09	74,42	63,87	75,26	61,82	68,09	6,28	
7,0	67,68	71,36	65,99	77,17	62,66	68,97	5,55	
7,5	71,20	76,28	71,28	77,64	68,83	73,05	3,74	
8,0	71,03	76,13	73,60	79,10	72,43	74,46	3,20	
8,5	72,40	79,79	74,70	79,74	73,45	76,02	3,52	
9,0	76,08	79,93	78,48	79,96	76,99	78,29	1,74	
9,5	81,00	82,29	81,92	82,30	79,80	81,46	1,07	
10,0	82,09	81,57	83,27	81,69	81,32	81,99	0,77	

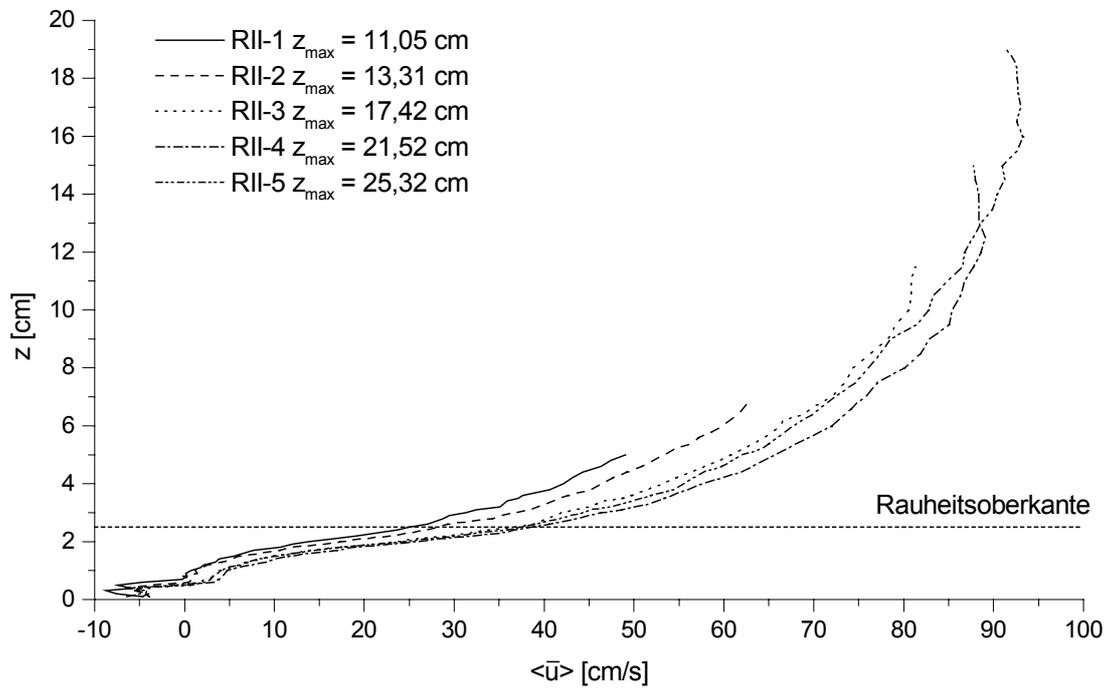
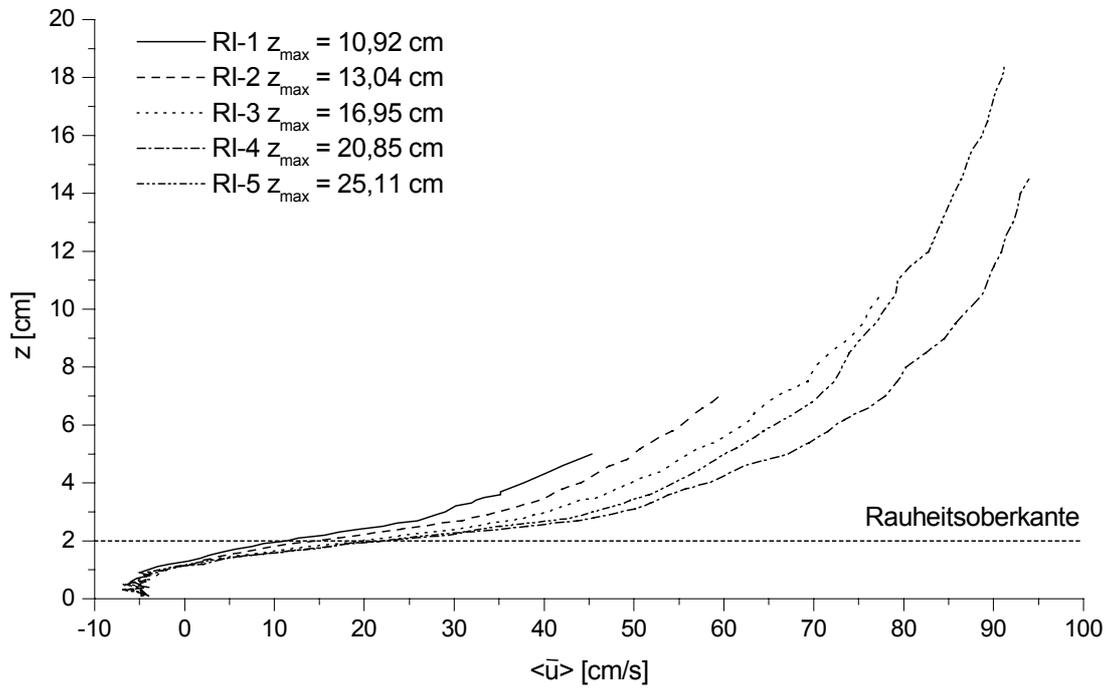
Rauheit	\bar{u} an der Messposition							$\langle \bar{u} \rangle$	$\sigma_{\bar{u}}$
	z	a	b	c	d	e			
	[cm]	[cm/s]	[cm/s]						
Fortsetzung RIII-5	10,5	84,09	84,74	82,49	83,00	83,02	83,47	0,92	
	11,0	86,02	86,42	84,77	83,05	85,65	85,18	1,34	
	11,5	85,61	87,05	88,09	84,33	87,15	86,45	1,48	
	12,0	89,16	86,46	86,24	84,03	90,19	87,22	2,47	
	12,5	88,88	87,77	90,68	84,77	90,38	88,50	2,39	
	13,0	90,23	88,73	90,91	85,61	91,02	89,30	2,26	
	13,5	92,15	90,33	91,13	85,89	91,34	90,17	2,48	
	14,0	92,33	90,00	91,43	84,28	93,94	90,40	3,70	
	14,5	92,83	91,60	94,64	85,09	94,54	91,74	3,93	
	15,0	94,34	91,19	95,07	86,57	94,68	92,37	3,59	
	15,5	95,83	89,38	96,98	85,90	95,95	92,81	4,90	
	16,0	94,99	91,32	95,47	86,04	95,48	92,66	4,09	
	16,5	96,98	91,12	95,98	85,87	97,24	93,44	4,90	
	17,0	98,15	90,02	97,02	85,84	97,56	93,72	5,50	
	17,5	97,74	89,57	96,78	85,96	94,88	92,99	5,04	
	18,0	98,22	89,24	97,15	84,99	96,78	93,28	5,85	
	18,5	97,31	88,23	96,30	84,30	95,96	92,42	5,81	
19,0	98,34	87,98	97,52	83,87	96,83	92,91	6,56		

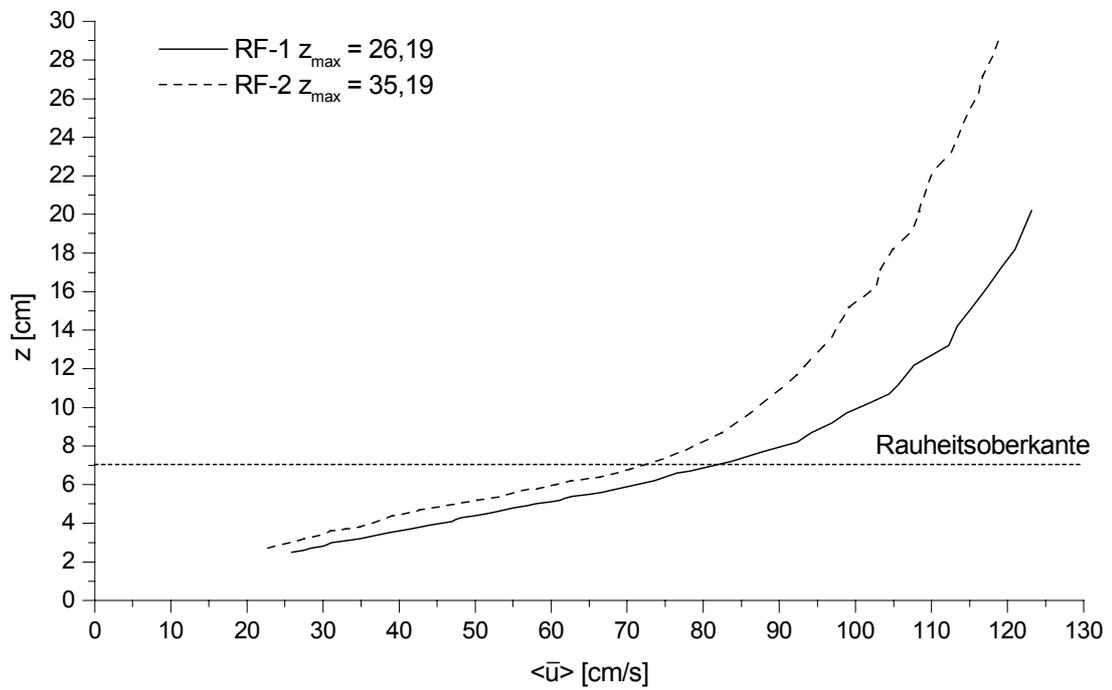
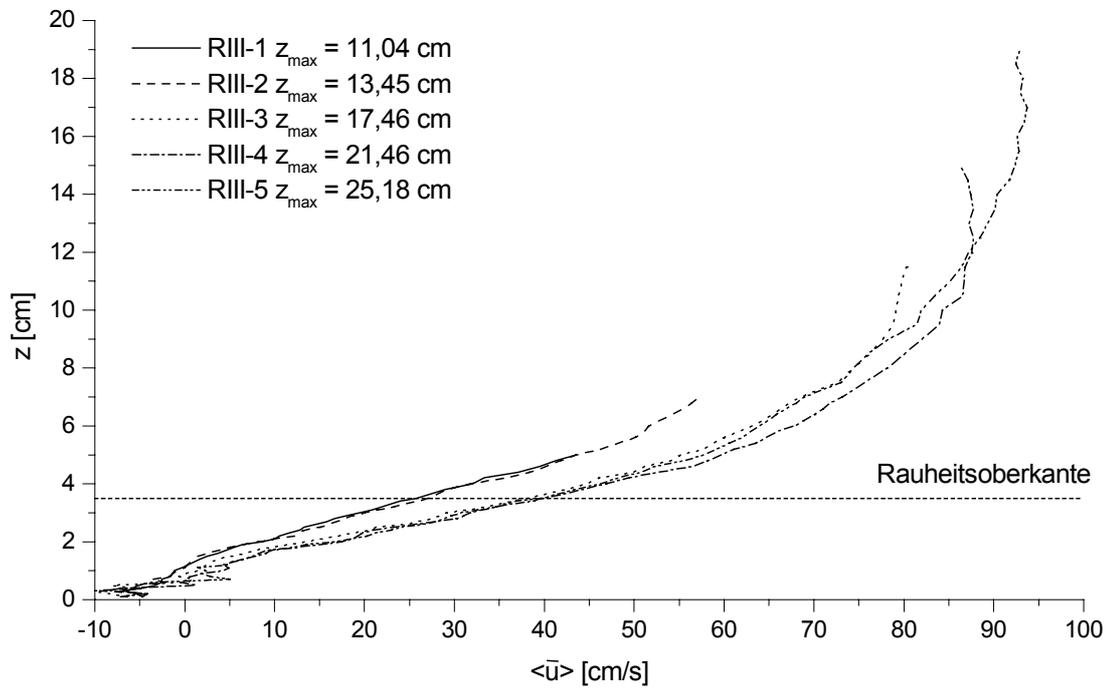
	\bar{u} an der Messposition											$\langle \bar{u} \rangle$	$\sigma_{\bar{u}}$
	z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
	[cm]	[cm/s]	[cm/s]										
RF-1	2,5		15,6			7,3	64,7		-10,5		52,4	25,9	31,55
	2,6		16,1			9,4	66,1		-8,2		53,8	27,4	31,28
	2,7		16,4			11,0	71,5		-12,7		56,1	28,4	34,50
	2,8		16,7			14,1	71,4		-10,4		58,4	30,0	33,85
	2,9		15,4			17,2	72,6		-12,7		59,7	30,5	35,01
	3,0		14,2			21,1	72,6		-13,3		61,0	31,1	35,26
	3,2		19,3			25,9	74,1		-7,6		62,3	34,8	33,23
	3,5					39,4	76,9		-0,5			38,6	38,70
	3,7		19,5			41,7	79,1		1,2		66,0	41,5	32,11
	3,9					49,6	79,1		3,6			44,1	38,08
	4,1				21,9	57,4	81,7	66,2	7,5			47,0	31,10
	4,2		22,2		23,2	60,9	84,0	62,3	8,5		70,4	47,4	28,88
	4,3				24,7	64,4	80,9	61,0	9,5			48,1	29,76
	4,4				26,4	66,3	83,7	62,7	11,8			50,2	29,92
	4,5				27,8	68,2	83,3	64,8	14,0			51,6	29,29
	4,6				29,9	69,1	85,2	63,9	16,0			52,8	28,78
	4,8				30,8		85,3	65,2	21,2	72,7		55,0	27,68
	4,9				30,8		86,7	67,3	24,3	75,5		56,9	27,76
	5,0				32,9		87,6	66,4	27,1	76,2		58,0	26,77
	5,1				34,9		89,8	67,9	29,8	77,3		60,0	26,42
	5,2		33,5		34,7	77,6	89,4	71,2	33,4	75,5	74,2	61,2	23,23
	5,3				34,5		90,1	70,9	37,0	76,4		61,8	24,80
	5,4				36,6		91,5	71,4	40,7	73,8		62,8	23,39
	5,5				38,7		90,8	75,6	44,5	74,8		64,9	22,29
	5,6				39,7		92,2	77,6	48,1	75,4		66,6	21,91
	5,7		40,2		40,6	79,3	94,4	77,2	51,7	77,2	80,6	67,6	20,49
	6,2		51,5		47,5	80,8	93,5	85,0	67,3	80,9	82,3	73,6	16,53
	6,6	59,2			53,6		96,0	90,6		83,2		76,5	19,01
	6,7	68,6	54,9		55,8	87,3	97,9	93,7	77,3	83,8	84,3	78,2	15,46
	7,2	85,7	65,0	72,7	63,6	93,1	100,3	94,8	84,6	92,1	86,0	83,8	12,66
	7,7	90,7	75,1	83,9	71,5	91,6	98,2	102,0	82,0	92,9	89,2	87,7	9,64
	8,2	95,2	81,3	90,7	77,4	96,3	103,5	101,7	86,9	98,0	92,7	92,4	8,46
	8,7	93,5	85,1	90,9	86,1	93,0	105,0	106,2	86,9	102,2	92,6	94,1	7,76
	9,2	95,9	90,6	93,3	89,1	102,4	109,8	104,7	87,1	99,3	97,0	96,9	7,26
	9,7	95,7	92,8	100,7	92,9	96,3	111,8	105,7	94,7	99,0	98,7	98,8	6,00
	10,2	100,0	99,5	100,2	95,5	107,4	110,5	111,3	90,9	103,5	97,7	101,6	6,54
	10,7	102,9	100,0	107,4	103,1	104,0	114,5	112,6	95,8	101,6	102,7	104,5	5,63
	11,2	103,7	101,8	110,5	105,0	103,8	115,0	113,4	99,2	105,6	98,6	105,7	5,62
	12,2	103,7	104,6	114,0	106,8	105,7	119,9	112,4	102,9	105,6	101,7	107,7	5,80
	13,2	111,5	111,4	116,0	116,5	113,8	117,8	114,5	101,0	112,5	107,9	112,3	4,91
	14,2	111,0	110,6	118,9	116,9	114,7	114,6	122,5	104,2	109,9	110,3	113,4	5,28
	15,2	114,8	115,9	120,7	117,9	114,5	118,3	119,8	109,0	108,7	114,0	115,4	4,11
	16,2	112,4	115,7	122,4	120,0	115,6	119,4	125,2	110,2	117,0	115,2	117,3	4,52
	17,2	117,3	118,1	124,8	120,3	120,0	122,9	124,0	107,7	115,9	119,5	119,1	4,92
	18,2	114,4	121,7	127,5	118,4	118,7	127,9	130,0	116,0	119,1	115,9	121,0	5,59
	20,2	117,3	118,9	125,0	120,2	123,0	130,4	131,3	118,0	124,9	122,4	123,1	4,86

	\bar{u} an der Messposition												$\langle \bar{u} \rangle$	$\sigma_{\bar{u}}$
	z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
	[cm]	[cm/s]												
RF-2	2,7		9,7			9,6	54,1		-2,8		43,2	22,7	24,50	
	3,2		10,8			20,1	57,9		2,6		46,6	27,6	23,66	
	3,4					28,3	59,8		1,7			29,9	29,07	
	3,6					28,9	62,0		2,3			31,0	29,90	
	3,7		15,7			33,5	62,1		3,3		50,5	33,0	24,15	
	3,8					38,1	62,2		4,3			34,9	29,08	
	4,2		18,6			22,5	46,4	64,5	50,2	7,8		54,2	37,7	21,25
	4,4					23,8	49,6	65,5	48,6	8,9			39,3	22,60
	4,6					28,1	53,8	66,4	49,6	13,1			42,2	21,33
	4,7		21,9			28,7	56,1	66,5	50,6	15,2		60,2	42,7	20,42
	5,2		27,8			33,9	60,5	69,8	54,2	26,3	64,7	65,9	50,4	18,12
	5,4					34,9	62,7	69,3	56,9	30,9	65,8		53,4	16,45
	5,6					35,5	63,4	70,2	57,8	37,5	66,5		55,2	15,03
	5,7		36,5			38,1	64,8	70,9	61,0	40,9	64,9	68,8	55,7	14,61
	5,8					40,6	66,2	71,6	64,3	44,3	63,3		58,4	12,70
	6,0					44,6	67,8	72,8	63,2	51,9	63,7		60,6	10,49
	6,2		44,5			49,2	67,3	74,8	65,1	57,3	69,1	73,7	62,6	11,20
	6,4						66,6	73,8	66,1	61,3	64,6		66,5	4,59
	6,8	70,1				70,4	74,6	71,3	64,9	71,2			70,4	3,14
	7,4	78,5		71,6		71,0		74,8	76,9	79,3			75,4	3,50
	7,8	84,8		74,8		78,3		72,8	74,0	81,1			77,6	4,67
	8,7	87,9	78,6	86,1	79,7	81,1	80,9	80,1	81,9	85,8	82,3		82,4	3,10
	9,7	91,5	90,2	90,8	88,6	77,9	82,9	81,3	85,9	85,7	86,6		86,2	4,41
	10,7	92,5	98,1	93,9	92,6	77,6	83,3	84,2	89,9	92,7	87,4		89,2	6,09
	11,2	98,6	94,6	103,5	93,0	82,7	83,4	82,7	88,0	92,7	90,6		91,0	6,98
	11,7	98,5	99,2	99,2	95,2	84,5	89,5	82,8	90,7	91,3	92,8		92,4	5,83
	12,2	99,7	96,1	103,2	98,2	76,9	92,6	87,9	90,7	94,4	94,8		93,4	7,30
	13,2	99,8	104,5	107,3	102,0	84,7	90,9	89,6	94,2	93,7	91,6		95,8	7,25
	13,7	97,4	102,1	108,2	104,8	85,5	94,1	88,8	89,8	98,8	100,8		97,0	7,38
	14,2	100,7	106,3	111,1	104,6	88,5	93,6	87,9	96,9	93,9	93,2		97,7	7,77
	15,2	103,2	107,9	111,8	106,8	82,8	96,5	90,5	98,8	96,0	97,5		99,2	8,65
	16,2	111,7	109,5	110,6	109,2	91,8	94,9	97,4	97,2	103,8	100,5		102,7	7,28
	17,2	112,4	106,6	115,1	109,9	95,6	96,3	96,6	98,3	100,5	101,9		103,3	7,20
	18,2	113,2	115,5	116,6	114,3	94,0	99,4	96,1	99,2	100,0	101,4		105,0	8,82
	19,2	114,9	114,7	118,7	114,3	98,3	100,0	98,1	99,7	107,8	109,0		107,5	7,97
	20,2	109,1	117,5	119,5	118,6	96,9	103,1	99,1	106,2	108,4	105,5		108,4	7,95
	22,2	117,6	116,3	119,1	113,5	99,6	106,1	104,0	104,5	112,6	107,6		110,1	6,63
	23,2	116,0	119,5	121,1	117,7	104,1	106,4	104,9	110,1	113,8	112,5		112,6	6,11
	25,2	118,4	123,0	126,1	119,8	105,3	111,4	108,3	109,1	111,9	113,4		114,7	6,83
	26,2	118,2	121,9	124,8	124,5	106,1	110,4	114,1	109,7	117,6	114,1		116,2	6,38
	27,2	120,3	121,5	125,3	123,0	108,6	112,4	112,7	114,9	112,1	116,8		116,7	5,52
	28,2	118,6	118,0	127,4	119,1	109,3	116,1	122,5	114,2	119,1	116,8		118,1	4,77
	29,2	121,9	124,7	128,1	123,5	109,9	116,5	116,8	114,4	118,0	115,8		119,0	5,49

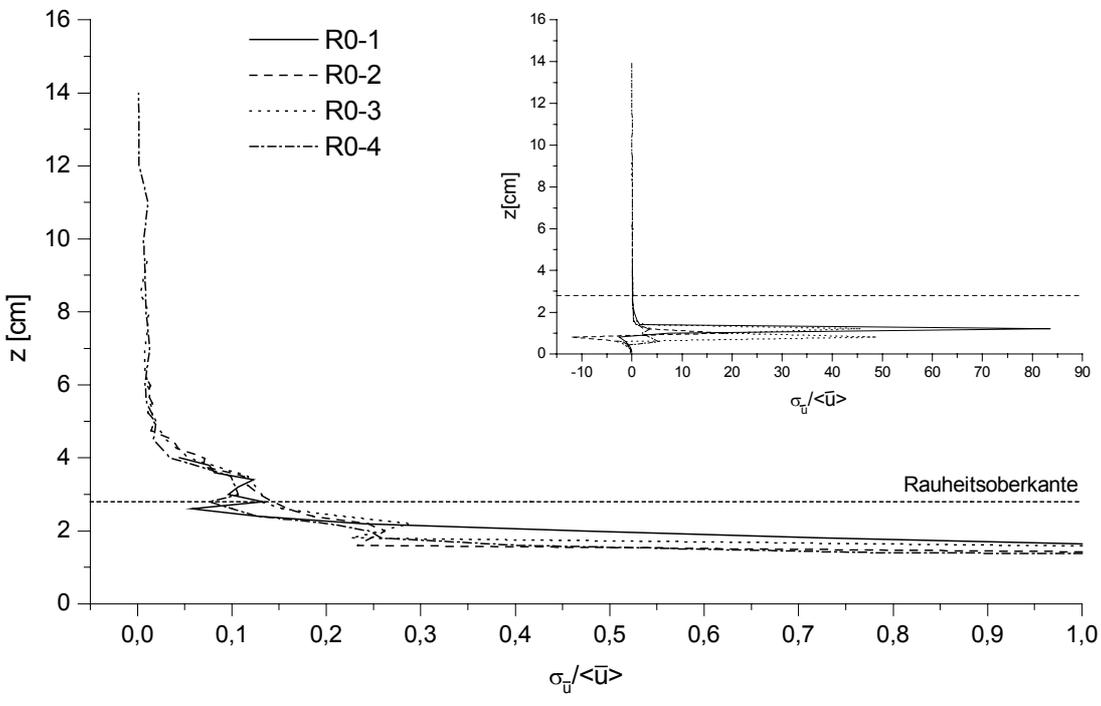
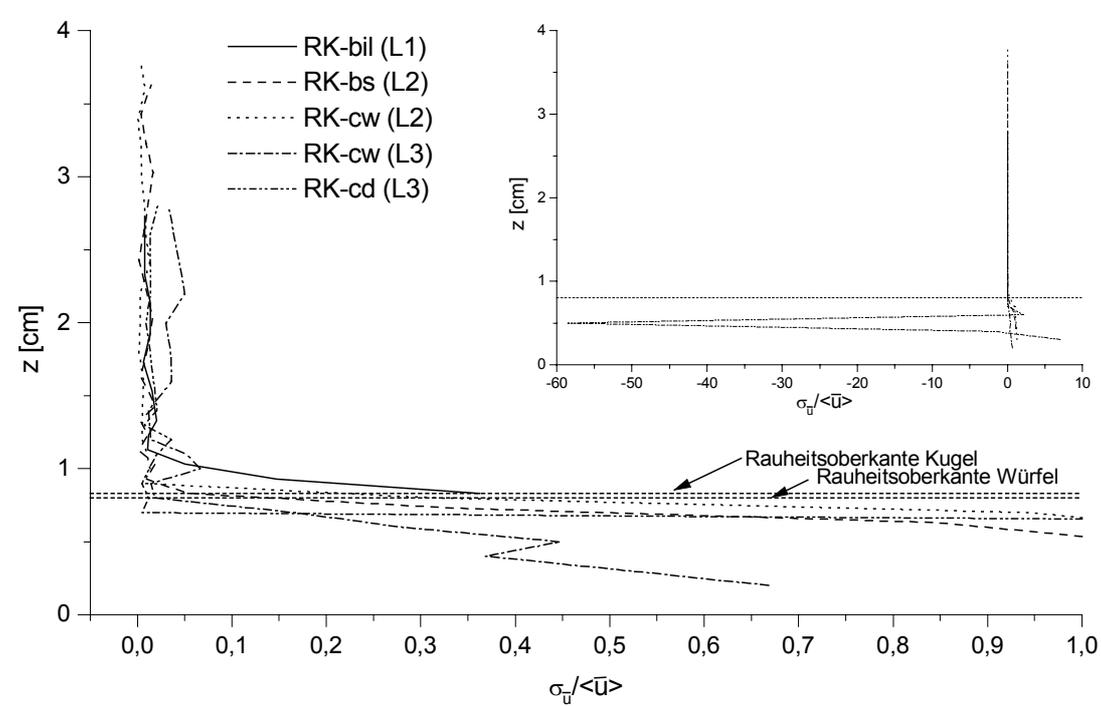
B.2 Darstellung der doppelt gemittelten Geschwindigkeitsprofile

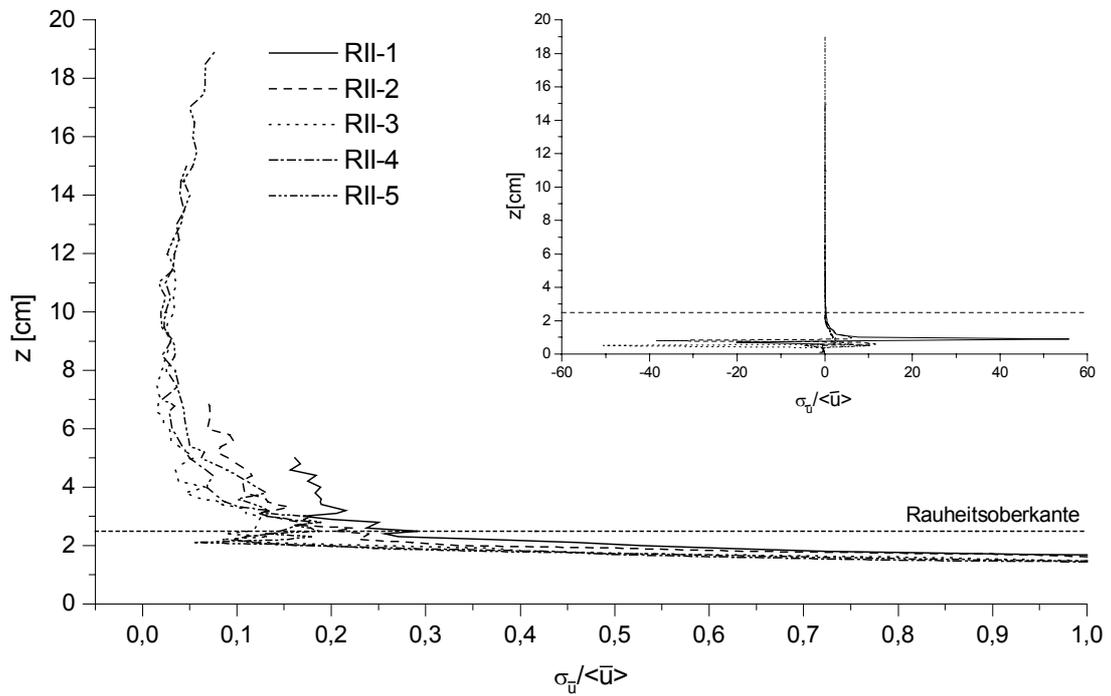
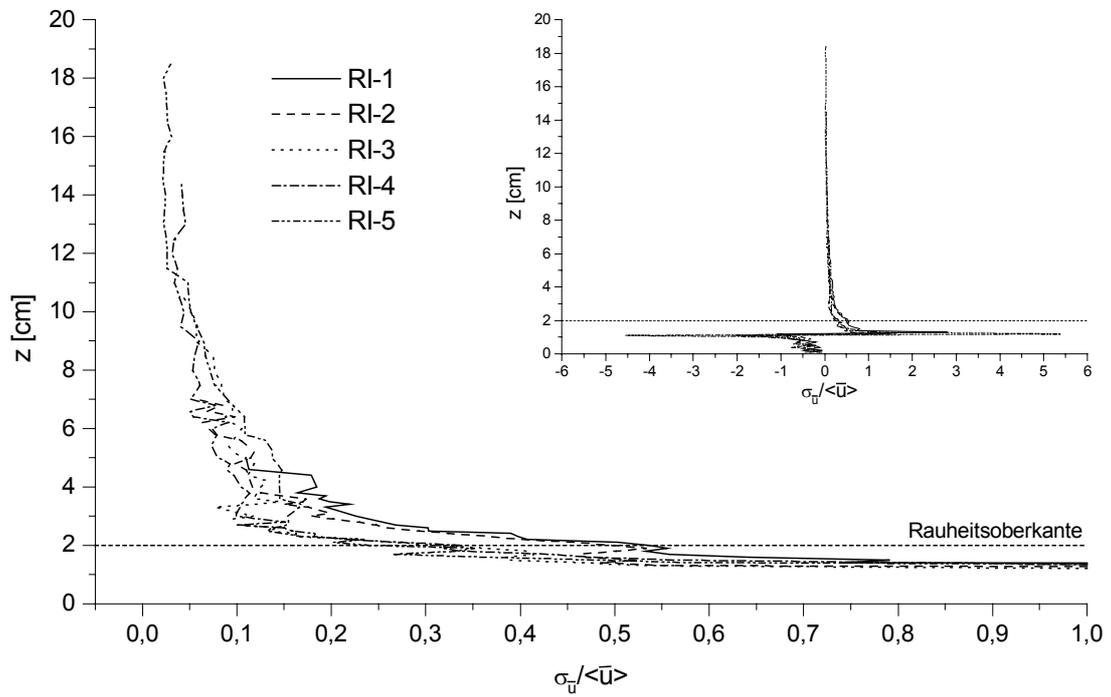


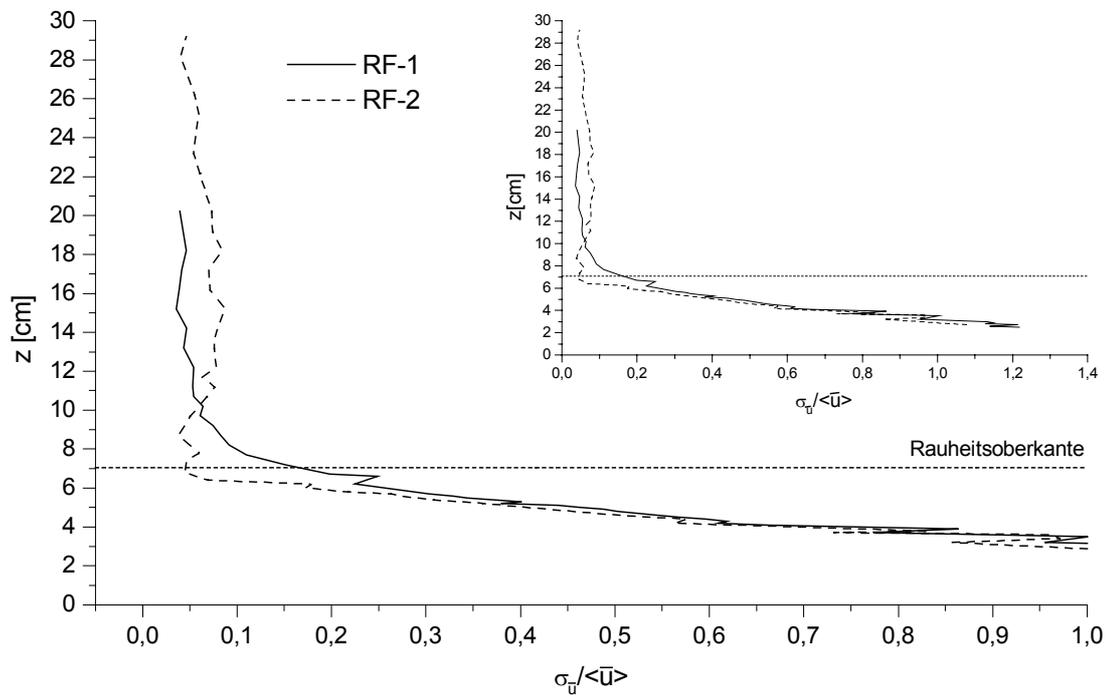
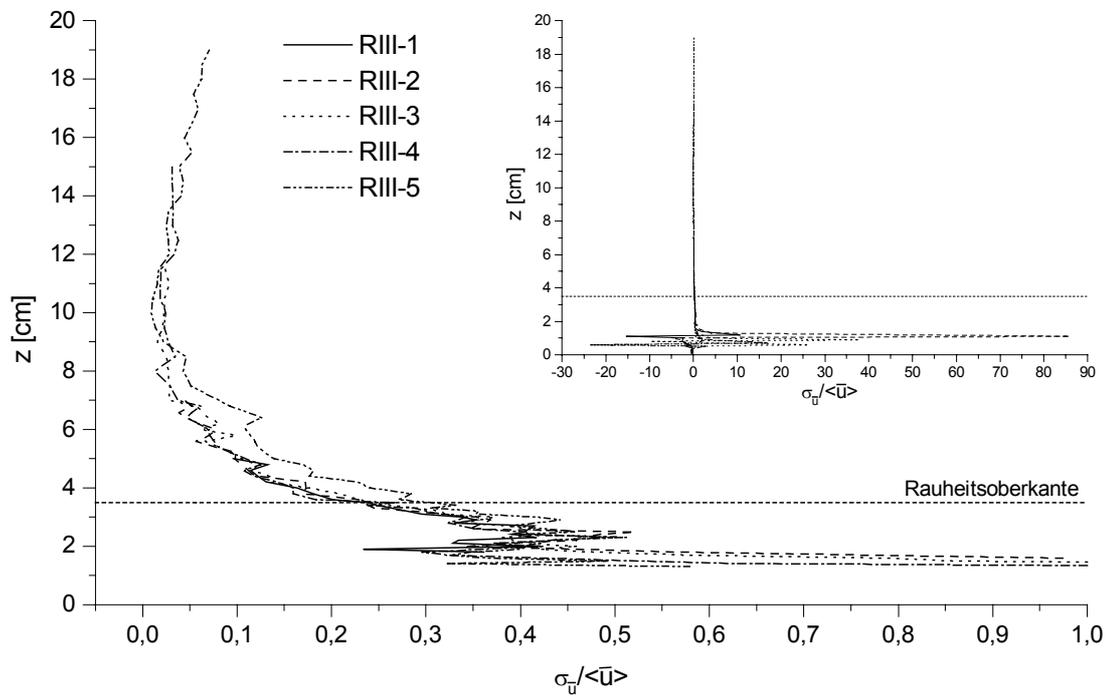




B.3 Darstellung der Profile der Rauheitsintensität







Lebenslauf

Name	Katinka Koll
Geburtsdatum	25.03.1968
Geburtsort	Hamburg
Nationalität	deutsch
Familienstand	ledig

Schulbildung

1974 - 1978	Grundschule Cuxhaven-Altenbruch
1978 - 1988	Amandus-Abendroth-Gymnasium Cuxhaven
18. Mai 1988	Abitur

Studium

1988-1996	Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Karlsruhe (TH)
21. März 1996	Diplom-Hauptprüfung, Vertiefungsrichtung Wasserbau
Mai - Dez. 1991	Mitarbeiterin der Firma Dr. Geldner, Beratendes Ingenieurbüro, Karlsruhe
März '92 - März '96	Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Wasserbau und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe (TH)
Mai - Juli 1996	Geprüfte wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Wasserbau und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe (TH)

Beruf

seit Aug. 1996	Wissenschaftliche Angestellte am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe (TH)
13.09. - 03.11.2001	Forschungsaufenthalt am National Institute of Water and Atmospheric Research Ltd, Christchurch, New Zealand