

Morphometrische Studien an Rinnensystemen mittels Laborversuchen

E. STOCKER, Salzburg

Mit 5 Abbildungen und 7 Bildern auf den Tafeln IV bis XI.

Fast alle Hänge, auch jene mit geringer Reliefenergie, werden von Rinnen durchzogen, deren Systemcharakter mehr oder weniger deutlich zu beobachten ist. Die Ausnahmen hinsichtlich ihrer Verbreitung beziehen sich weniger auf Fälle intensiver Verkarstung, als mehr auf Hänge mit ausgeprägtem Formenschatz von Hanggleitungen oder jungen glazial-erosiven Formen.

Man unterscheidet im allgemeinen Formen der Hangzerrung (J. BÜDEL 1948, S. 34) mit parallel verlaufenden kaum sich vereinigenden Rinnen und Formen der Hangzerschneidung mit Haupt- und Seitenrinnen. S. MORAWETZ (1962, S. 260—272) beschreibt auf Grund von Erscheinungsbildern der Natur verschiedene Typen von Rinnensystemen. Sie sind besonders in homogen wirkenden Schiefer-, Gneis- und Granitgebirgen aber auch in dolomitischen Gesteinen weit verbreitet und gestalten vielfach die Hänge des Hochgebirges. Ihr Systemcharakter konnte außer mit Hilfe der Naturbeobachtung auch auf Grund von Experimenten und theoretischen Abhandlungen erwiesen werden (T. A. JAGGAR 1908, S. 294, H. PRECHTL 1965, S. 67).

Angeregt durch die Forschungen der angewandten Hydrologie sind im Bereiche der Geomorphologie von Entwässerungssystemen grundlegende Erkenntnisse von HORTON, weiter entwickelt von STRAHLER, SCHEIDEGGER, SHREVE u. a. (A. N. STRAHLER 1969, S. 481—497) gewonnen worden, indem ein Rinnensystem in seine einzelnen Äste zerlegt und diese wiederum nach Ordnungen gegliedert werden. Es ergeben sich Verhältnisse zwischen den verschiedenen Ordnungen hinsichtlich der Anzahl der Flußabschnitte, weiters deren mittlere Länge, deren Flußgefälle, deren Einzugsgebietsflächen. Bei allen diesen Verhältnissen werden geometrische Reihen angestrebt.

Hier sollen einige für die Hanggestaltung besonders wesentliche Erscheinungen an einzelnen Beispielen in den Ostalpen und anhand von Laboruntersuchungen analysiert werden. Es sind dies die Flußhäufigkeit (stream frequency) F und die Eintiefung der Rinnen (local relative relief of valley-side) h in ihren Verhältnissen zu den Flußordnungen; der Aspekt der Entwicklung von Systemen und Probleme in der Geländepraxis sollen erörtert werden.

Die Eintiefung h wird als Abstand zwischen der Tiefenlinie und der umgebenden Vollform, also parallel zur Hangneigung aufgefaßt, da eine vertikale Messung der Höhenunterschiede zwischen Tiefenlinien und Rücken bei steilem Gelände zu hohe Werte ergeben würde.

Unter **Flußhäufigkeit** versteht man die Anzahl der Gerinneabschnitte in der Flächeneinheit; damit ist jedoch eine Messung getrennt nach Ordnungen nicht möglich, da man innerhalb einer Flächeneinheit von 1 km² verschiedenerlei Ordnungen vorfindet. Die Messung erfolgt daher nach Gerinneabständen einer Ordnung mit Angabe der Rinnenanzahl in der Längeneinheit von 1 km. Die Werte sind morphometrischer Art und stammen aus der Österreichischen Karte 1:25.000 oder 1:50.000. Um die durch die Generalisierung entstandenen Fehler möglichst auszuschalten sind auch kerbtälchenartige Tiefenlinien ohne eingezeichnetem Gerinne für die Messungen herangezogen worden; teils wurden auch Luftbilder zu Hilfe genommen. Tabelle 1 zeigt die Messungsergebnisse der Beispielsgebiete aus verschiedenen Gesteins- und Reliefbereichen. Die Anzahl der Messungen ist auf 10 pro Ordnung beschränkt, da es innerhalb eines Systems meist nicht möglich ist, eine höhere Anzahl für alle Ordnungen aufrecht zu erhalten, was zum Vergleich der Werte aber notwendig erscheint.

Tab. 1: Morphometrische Eintiefungs- und Flußhäufigkeitsmessungen

1) **L a k a** N- und E-Flanke, Gailtaler Alpen, 1852 m

Höhenunterschied: 600—900 m

Hangneigung: N-Seite 33—37°, max 47°/200 m HU, E-Seite ca. 25—30°

Gestein: Hauptdolomit

	Eintiefung				Flußhäufigkeit			
	N	h (m)	s (m)	v (‰)	N	F	s	v (‰)
1. Ordnung	10	6,9	2,2	31,9	10	10,5	2,1	20,0
2. Ordnung	10	31,5	16,1	51,2	10	3,8	0,88	23,1
3. Ordnung	10	107,0	47,3	44,1	10	2,4	0,91	38,0

2) **S t a g o r** S-Flanke, Kreuzeckgruppe, 2288 m

Höhenunterschied: 1400—1700 m

Hangneigung: Mittel 39°, max 65°/200 m HU

Gestein: Gneise, Glimmerschiefer, Amphibolite, bergwärts einfallend

	Eintiefung				Flußhäufigkeit			
	N	h (m)	s (m)	v (‰)	N	F	s	v (‰)
1. Ordnung	10	5,3	2,7	51,0	10	22,8	4,6	20,2
2. Ordnung	10	14,5	5,7	39,3	10	10,7	3,7	34,6
3. Ordnung	10	40,0	15,6	39,1	10	4,2	1,5	37,2
4. Ordnung	10	94,0	28,0	29,8	10	1,6	0,9	56,2
5. Ordnung	7	164,0	29,9	18,2				

- 3) Uttendorfer bis Piesendorfer Hochsonnberg, 2249 m
 Höhenunterschied: 800—1100 m (Basis bei 1100 m)
 Hangneigung: gesamt 15—18°, häufig 30° max 42°/200 m HU
 Gestein: Grauwackenzone — Phyllite, Schiefer.

	Eintiefung				Flußhäufigkeit			
	N	h (m)	s (m)	v (‰)	N	F	s	v (‰)
1. Ordnung	10	5,6	2,0	35,7	10	15,1	5,3	35,1
2. Ordnung	10	16,0	7,5	46,8	10	7,0	2,2	31,4
3. Ordnung	10	68,0	37,7	55,4	7	2,5	0,2	8,0
4. Ordnung	10	254,0	66,5	25,4	10	0,7	0,2	27,7

- 4) Alpenberg N-Seite (Östlich Attersee) 972 m
 Höhenunterschied: 350—450 m
 Hangneigung: gesamt 11°, häufig 14°, max 34°/100 m
 Gestein: Kreideflysch

	Eintiefung				Flußhäufigkeit			
	N	h (m)	s (m)	v (‰)	N	F	s	v (‰)
1. Ordnung	10	6,0	2,1	35	10	11,3	4,9	43
2. Ordnung	10	28,0	13,2	47	10	3,8	0,1	3
3. Ordnung	6	116,7	26,6	23	3	1,1	0,2	19

N = Anzahl der Messungen

h = mittlere Eintiefung in Meter

s = Standardabweichung in Meter

F = Flußhäufigkeit (Anzahl der Tiefenlinien bezogen auf eine 1 km lange Strecke)

v = Variabilität in Prozenten

Die Standardabweichung ist erwartungsmäßig bei derart kleinen Populationen relativ hoch, was durch die durchschnittliche Variabilität von 38% für die Eintiefung und 29% für die Flußhäufigkeit ausgedrückt wird. Bei der Auswahl der Gebiete sollten offensichtlich polygenetische Systeme nicht vorkommen. Im Falle des Uttendorfer Hochsonnbergs dürften die Linien der 4. Ordnung ziemlich sicher bereits einem alten System angehören. Es zeigt sich hier eine Störung bei den Linien 3. Ordnung, die nur spärlich zu finden sind (hohe Variabilität der Eintiefungswerte).

Trägt man die erhaltenen Werte in ein Koordinatensystem mit logarithmischer Ordinate für die Eintiefungswerte und arithmetischer Abszisse für die Ordnungen, so kann aus den gegebenen Punkten eine Regressionsgerade mit positiver Exponentialfunktion gezogen werden (Abb. 1). Entsprechend dem Bifurkationsverhältnis, dem Längenverhältnis oder dem Flächenverhältnis kann nun das Eintiefungsverhältnis (R_e) ermittelt werden. In der gleichen Vorgangs-

weise für die Flußhäufigkeit ergeben sich Regressionsgerade mit negativer Exponentialfunktion (R_d).

$$R_e = \frac{h_u}{h_{u-1}}; \quad R_d = \frac{F_u}{F_{u+1}}$$

Für die vier Beispielsgebiete ergeben sich folgende Verhältniswerte:

Tab. 2: Eintiefungs- und Flußhäufigkeitsverhältnis

	R_e	R_d
Laka	4,0	2,17
Stagor S	2,4	1,78
Utt.-Piesdrf. Hochsonnberg	3,6	2,85
Alpenberg/Attersee	4,4	3,21

Die Gültigkeit des Eintiefungsverhältnisses besteht selbstverständlich nur bei Möglichkeiten uneingeschränkter Tiefenerosion. Meist entwickeln Linien 1. Ordnung ausschließlich Tiefenerosion, zumindest während ihrer Aktivität oder Bildungszeit; je höher die Ordnung umso mehr besteht im allgemeinen die Tendenz zur Akkumulation. Nur wenn viel Reliefenergie vorhanden ist, wird weiter Tiefenerosion stattfinden. Je höher die Ordnung, umso mehr wird eine Normalgefällskurve im Längsprofil erscheinen, so daß der Punkt der größten Tiefenerosion weiter oben liegt. Um noch der Vorstellung uneingeschränkter Tiefenerosion gerecht zu werden, müssen die Messungen weiter oben erfolgen. Trotzdem erreichen die Eintiefungswerte der letzten Ordnung nicht mehr das nach der Regressionsgeraden zu erwartende Ausmaß (Stagor S). Durch die Denudationsvorgänge werden auch die dazwischen gelegenen Rücken oder Hangpartien in der langen Zeit, die zur Bildung eines hochrangigen Gerinnebettes notwendig ist, erniedrigt, so daß die gemessenen Werte ebenfalls niedriger liegen.

Die Regressionsgeraden für R_e und R_d verlaufen für alle Gebiete relativ eng gestreut, wenn sich auch klar meßbare Unterschiede zeigen. Je steiler die Gerade, umso mehr wächst die Eintiefung mit höherer Ordnung, wie etwa im Gebiet des Alpenberges in der Flyschzone; das Gegenteil sieht man am Stagor S-Hang, wo auch hohe Ordnungen relativ wenig eingetieft sind. Die Ursachen für den hohen Steigungswinkel der Geraden können im Entwicklungsstadium, im Gestein, aber auch in der Steilheit des Böschungswinkels liegen. Bei sehr großen Gesamtböschungswinkeln müßten bei größeren Eintiefungen die Einzelböschungswinkel ansteigen, was Tab. 3 verdeutlicht.

Bei einer Standfestigkeit des Gesteins, die nur Böschungswinkel bis maximal 45° zuläßt, kann bei 40° Gesamtneigung maximal nur die Hälfte der Rinneneintiefung geleistet werden als bei 10° Gesamtgefälle. Die Korrelation Eintiefung — Ordnung kann aus Hängen in der Natur vielfach wegen der Verzahnung von verschiedenen Systemgenerationen nicht mehr mit Sicherheit durchgeführt werden; ältere Systeme können teilweise zerstört worden sein, neue Systeme entstanden unter anderen Entwicklungsbedingungen. Beispiele dafür kommen vor

Tab. 3: Geometrisch mögliche Eintiefungsbeträge bei konstanter Rinnenbreite und verschieden steilen Gesamt- und Seitenhängen

Rinnenbreite 100 m bei	Gesamthangneigung				
Seitenhänge 60°	10°	20°	30°	40°	50°
Rinntiefe	83 m (96%)	76 m (88%)	68 m (79%)	57 (66%)	40 m (46%)
Seitenhänge 45°					
Rinntiefe	47 m (94%)	44 m (88%)	36 m (72%)	23 m (46%)	

allem im Hochgebirge verbreitet vor. Ein präglazial anzunehmendes Entwässerungssystem wurde durch glaziale Erosion gerade an den oberen Verzweigungen meist völlig beseitigt, wodurch die Linien niederer Ordnung wegerodiert wurden und die Tiefenlinien höherer Ordnung umgestaltet wurden; ihre frühere Ordnung ist nicht mehr festzustellen. An den Karflanken bildeten sich postglazial oder bereits interglazial neue Rinnensysteme. Ihre Verbindung zu den tieferen Einschnitten ist so disharmonisch; je näher man in den Wirkungsbereich der Gletscher gelangt, umso häufiger trifft man nur wenig in Rundhöckerfluren eingetiefte Gerinne, deren starke Wasserführung in keiner Relation zur Eintiefung steht.

Außerhalb des starken glazialen Einflußbereichs können jedoch gut Korrelationen zwischen der Rinnenhäufigkeit und der Eintiefung hergestellt werden. Für gleiche Hangneigung und gleiches Gefälle der Seitenhänge der Rinnen ergibt sich für jede Rinnendichte rein geometrisch die entsprechende maximale Eintiefung (Tab. 3) x nach der Funktion: $h = \frac{a}{F}$; die Eintiefung wird mit h bezeichnet, a bedeutet eine Konstante und F die Anzahl der Rinnen bezogen auf 1 km. Eine Korrelation der beiden Variablen auf doppelt logarithmischem Papier (Abb. 2) zeigt wiederum die Streuung längs einer Regressionsgeraden mit negativer Exponentialfunktion. Die einzelnen Punkte bedeuten Rinnensysteme verschiedener Eintiefung; Beispiele sind aus dem Bereich der Zillertaler Alpen, der Salzburger Grauwackenzone und aus den vier Beispielsgebieten entnommen, wobei sich hier für die Ordnungen die Punkte ergeben.

Für die Regressionsgerade lautet die Funktion $h = \frac{a}{F^z}$; z. B. würde sich für die Zillertaler Alpen als Konstante $a = 220$ ergeben und für den Exponenten $z = 1,25$, für die Salzburger Grauwackenzone (7 Systeme) $a = 165$, $z = 1,18$, für die Kreuzeckgruppe (7 Systeme) $a = 132$, $z = 1,0$ und bei 40° Gesamtneigung mit Rinnenhängen von 45° $a = 230$, $z = 1,0$.

Die Konstante a gibt die mittlere Eintiefung bei einer Rinnenbreite von 1 km an. Wenn der Exponent z von 1 abweicht, bedeutet dies ein verschiedenes Verhalten der Eintiefung bei verschiedenen Rinnenabständen; im Falle der Beispiele aus den Zillertaler Alpen und der Grauwackenzone sowie Laka und Alpenberg sind die größeren Gerinne im Verhältnis zur Breite stärker eingetieft, als die kleineren. Streng genommen müssen bei derartigen Korrelationen

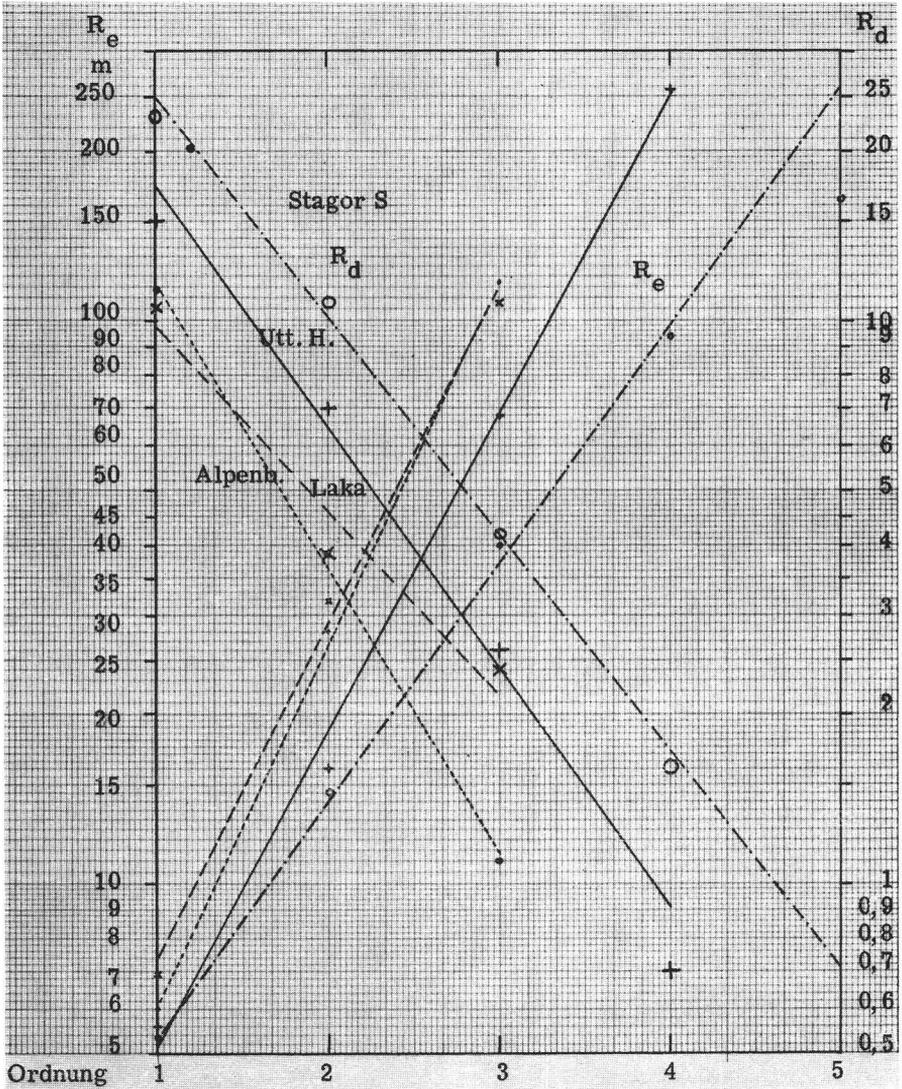


Abbildung 1: Eintiefungsverhältnis — Flußhäufigkeitsverhältnis

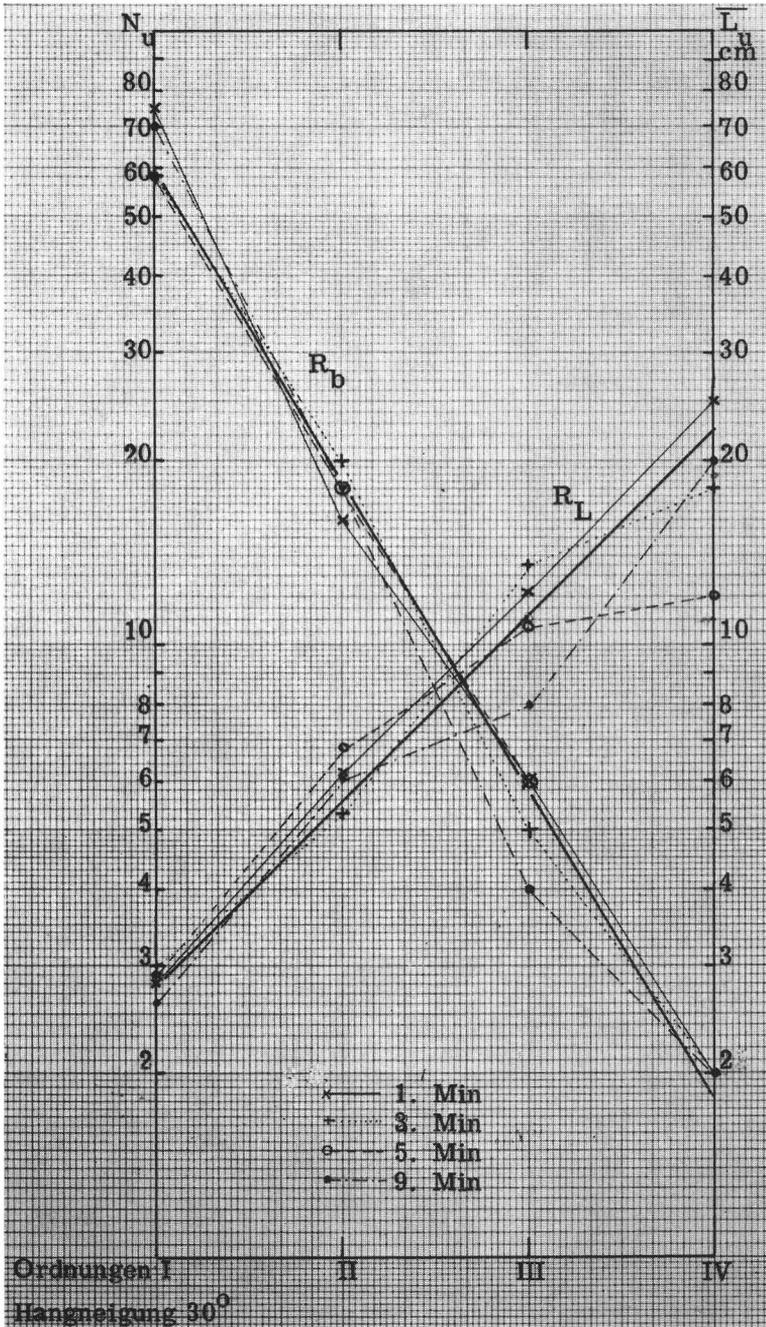


Abbildung 3

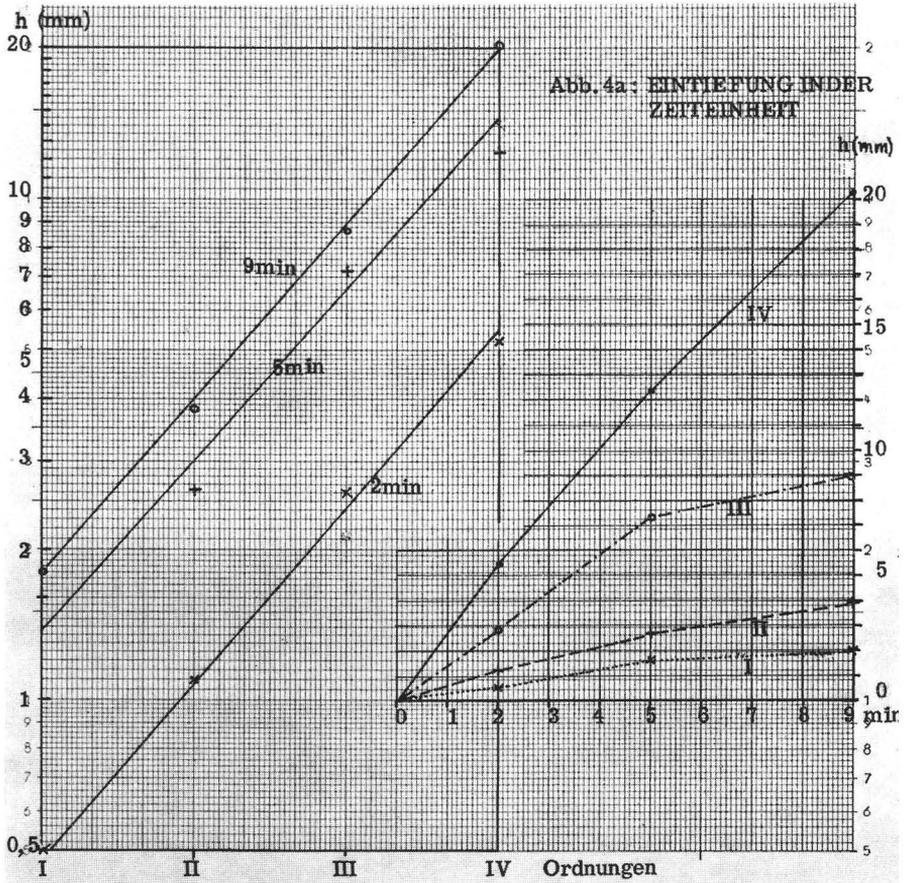


Abbildung 4: Eintiefungsverhältnis von Rinnensystemen im Laborversuch. Hangneigung 30°

Zu Abbildung 5 nebenstehender Tafel VIII: Eintiefungsverhalten von Rinnen im Laborversuch. Hangneigung 20°

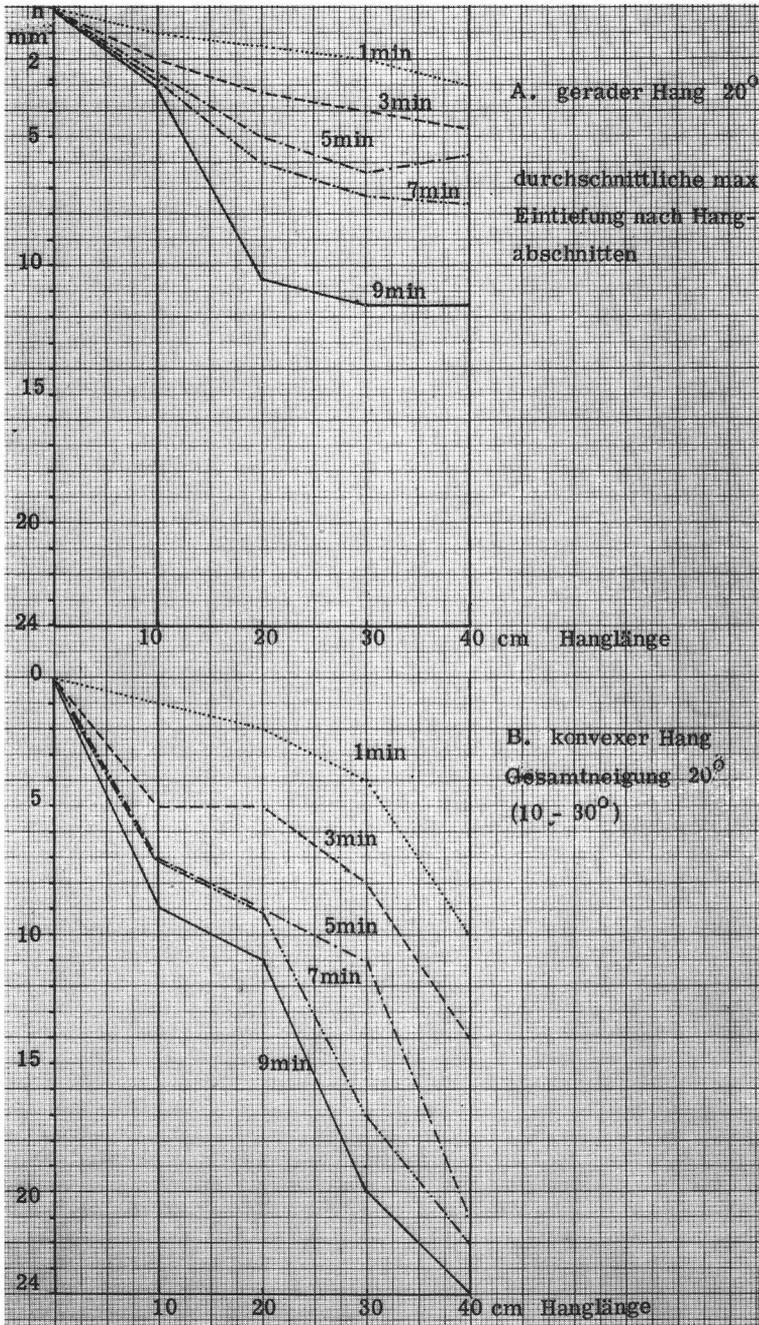


Abbildung 5

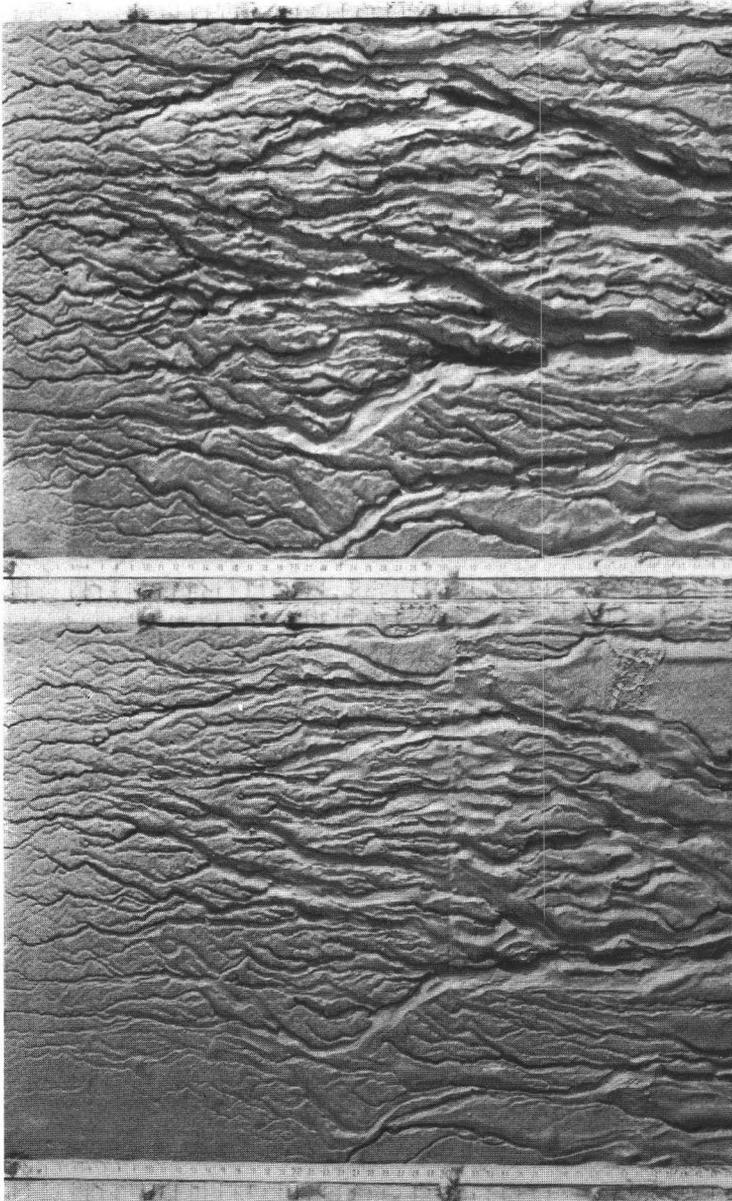


Bild 1

Bild 2

Rinnensysteme im Feinsand bei einer Hangneigung von 30° nach einer Besprühung von 1 Minute (Bild 1) und von 3 Minuten (Bild 2)

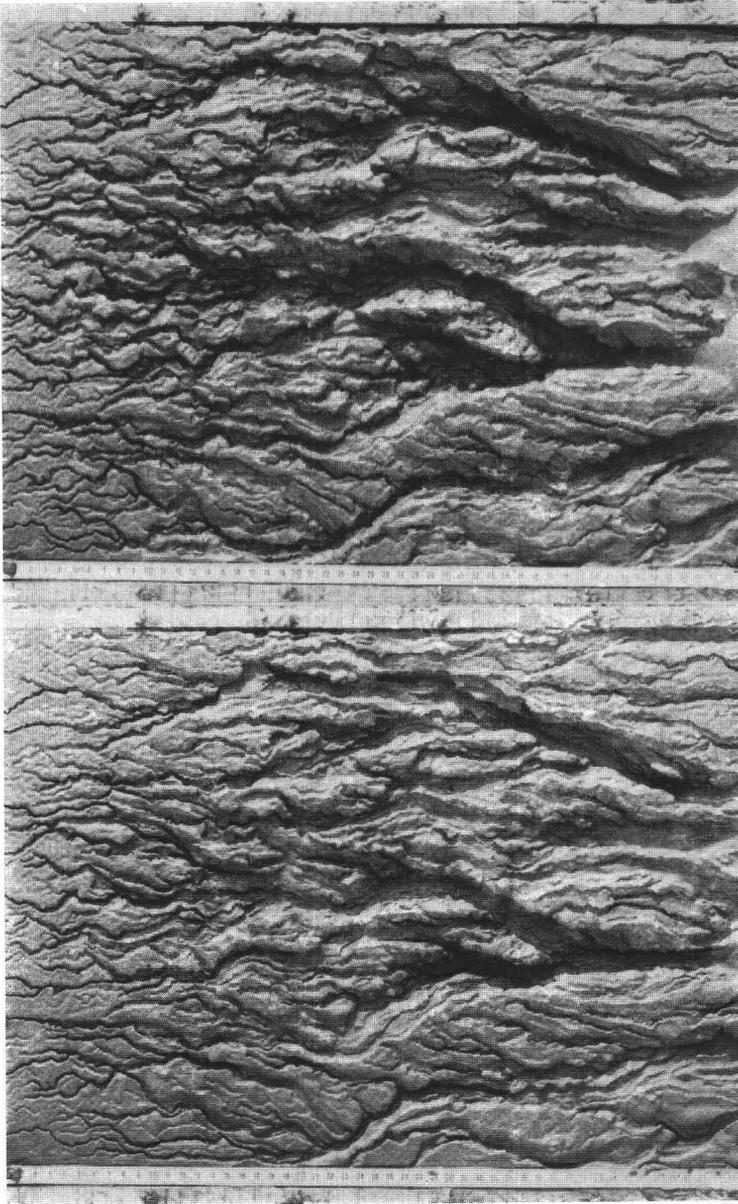


Bild 4

Bild 3

Rinnensystem im Feinsand bei einer Hangneigung von 30° nach einer Besprühung von 5 Minuten (Bild 3) und von 9 Minuten (Bild 4)

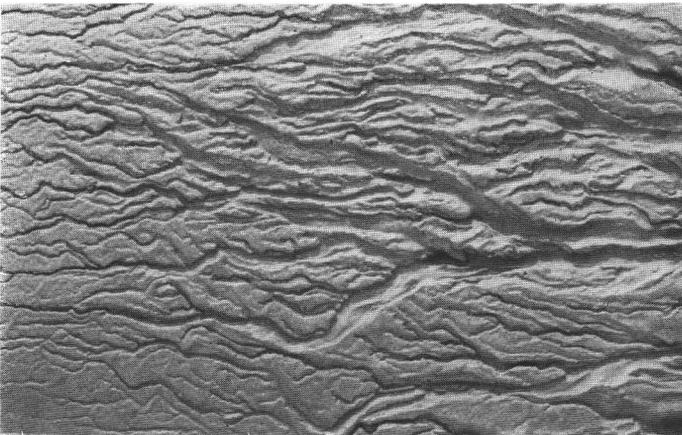


Bild 5

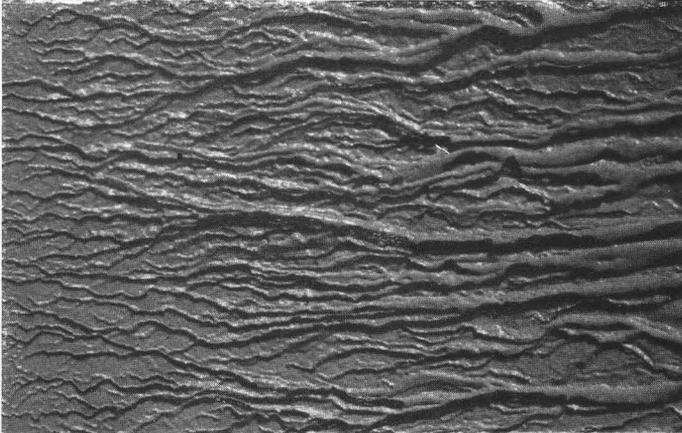


Bild 6

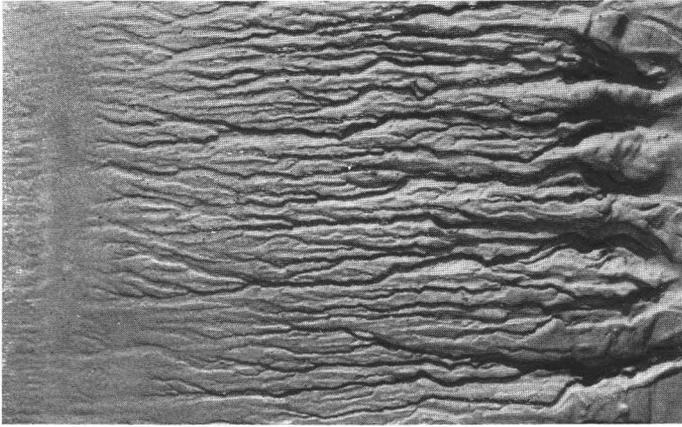


Bild 7

Rinnensysteme im Feinsand auf einem Ausschnitt von 30 mal 45 cm Fläche nach 2 Minuten Besprühung; Bild 5 zeigt einen geraden Hang mit 30° Neigung, Bild 6 einen solchen von 34° und Bild 7 einen konvexen Hang von 10° bis 30° Neigung und 20° Gesamtgefälle

von Parametern Grundbedingungen wie Hangneigung und Hangform, geologische Verhältnisse, Höhenunterschied und sonstige Bildungsbedingungen wie Wasserangebot und klimatische Verhältnisse gleich sein. Die Praxis zeigt, daß dabei keine zu strenge Handhabe möglich und scheinbar auch nicht erforderlich ist. Bei Einzeluntersuchungen müßten allerdings Trennungen nach den wichtigsten Expositionen, Hangneigungen und relativen Höhen gemacht werden. Trotz der Vorstellung geometrischer Modelle zur Eichung der Werte stellt sich allerdings die Frage nach der Zeitfunktion.

Frage der Entwicklung von Rinnensystemen:

Es geht also um die Beantwortung der Frage, inwiefern die in der Natur oder morphometrisch aus Karten gewonnenen Werte wie etwa die Verhältniswerte allgemein oder hier insbesondere das Eintiefungs- und Flußhäufigkeitsverhältnis sowie der Steigungswert und die Lage der Regressionsgeraden des Verhältnisses Eintiefung-Flußhäufigkeit von der Zeitfunktion abhängig sind. Schreitet die Eintiefung mit der Zeit linear voran oder erfolgt eine Entwicklung der Eintiefung mit der Zeit vielleicht auch in Form einer geometrischen Reihe; damit könnten auch Aussagen über die Ausbreitung von Systemen und deren Bildungszeit gemacht werden. Der Versuch der Beantwortung dieser Fragen wird anhand von Laborexperimenten mit Sand unternommen.

Die Versuchsreihe * erfolgte mit Sandflächen von 37 mal 50 cm bei einer Neigung von 30° (Einzelversuche auch mit 20° und 34°). Die geneigten Sandflächen wurden mit einer Düse SZO/0,6/45° (300 ml/min) im allgemeinen 9 Minuten lang mit Wasser besprüht. Dabei handelte es sich um großteils sehr feinen Sand bis Silt (größer 0,2 mm — 1,6%; 0,2 bis 0,1 mm — 26,7%; 0,1 bis 0,04 mm — 46,9%; feiner 0,04 mm — 25,0%), der mit 46% Wasser versetzt ein Feuchtsandvolumen erreicht, das gleich dem Trockensandvolumen ist.

Selbstverständlich können Material, Größenordnung und Bildungsbedingungen der Natur nicht im Laborversuch nachgeahmt werden; es genügt daher,

Tab. 4: Bifurkationsverhältnis an Rinnensystemen eines Sandversuchs.
Gerader Hang, Neigung: 30°

Versuch 1: Bifurkationsverhältnis

	1. Ordnung	2. Ordnung	3. Ordnung	4. Ordnung
1. Min N_u	75	16	6	2
R_b		4,7	2,7	3,0
3. Min N_u	58	20	5	2
R_b		2,9	4,0	2,5
5. Min N_u	58	18	6	2
R_b		3,2	3,0	3,0
9. Min N_u	70	18	4	2
R_b		3,9	4,5	2,0
$\overline{R_b} = 3,2$				

* Die Versuche erfolgten im geomorphologischen Labor des Geographischen Instituts der Universität Salzburg.

wenn die aus der Natur gewonnenen Verhältniswerte auch im Sandversuch nachzuweisen sind.

Auf logarithmischem Papier ergeben sich Regressionsgerade negativer exponentieller Funktion; das Bifurkationsverhältnis ist ähnlich den in der Natur gemessenen Werten (Abb. 3, Bilder 1—4).

Tab. 5: Längenverhältnis an Rinnensystemen eines Sandversuchs.
Gerader Hang, Neigung: 30_u

Versuch 2: Längenverhältnis (Abb. 3)

	1. Ordnung	2. Ordnung	3. Ordnung	4. Ordnung
1. Min \overline{L}_u (cm)	2,8	6,2	12,2	25,0
R_L	2,2	2,0	2,1	
3. Min \overline{L}_u	3,0	5,3	13,5	18,0
R_L	1,8	2,5	1,3	
5. Min \overline{L}_u	2,9	6,8	10,7	12,0
R_L	2,4	1,6	1,1	
9. Min \overline{L}_u	2,6	6,1	8,0	20,0
R_L	2,4	1,3	2,3	

Auch hinsichtlich des Längenverhältnisses zeigt sich eine Übereinstimmung von Ergebnissen wirklicher Entwässerungssysteme. Auf logarithmischem Papier ergibt die Verbindung der Werte eine ansteigende Gerade. Der normale R_L -Wert liegt bei den Sandversuchen um 2,2. In drei Fällen kommt es zu einer wesentlichen Unterschreitung dieser Zahl, die allerdings in der Kleinheit des Untersuchungsausschnittes begründet zu sein scheint. Bei der Bildung höchstrangiger Tiefenlinien kann es zu Verzögerungen kommen; im Falle des obigen Versuchs hat die Linie 4. Ordnung ihre ihr gesetzmäßig zustehende Länge in der 3. bis 5. Versuchsminute noch nicht erreicht, was ihr erst in der 9. Minute auf Kosten der Längen der 3. Ordnung gelingt (Anzapfung). Diese lokalen Verschiebungen

Tab. 6: Eintiefungsverhältnis an Rinnensystemen eines Sandversuchs.
Gerader Hang, Neigung: 30°, 10 Messungen/Ordnung

Versuch 3: Eintiefungsverhältnis (Abb. 4)

	1. Ordnung	2. Ordnung	3. Ordnung	4. Ordnung
2. Min \overline{h} (mm)	0,5	1,1	2,6	5,2
R_e	2,2	2,4	2,0	
5. Min \overline{h}	1,6	2,6	7,2	12,3
R_e	1,6	2,8	1,7	
9. Min \overline{h}	1,8	3,8	8,8	20,2
R_e	2,1	2,3	2,3	
$\overline{R}_e = 2,2$				

dürften sich bei Untersuchung größerer Ausschnitte wahrscheinlich aufheben. Auffällig ist, daß sich bereits in der 1. Minute (Abb. 3) ein harmonisches Längenverhältnis entwickeln konnte, was seinen Grund wahrscheinlich in der geringen Eintiefung hat; bei der Zunahme der Eintiefung muß es zu verschiedenerlei Anzapfungen und damit zu Verzögerungen bzw. Störungen in der Herstellung des Längenverhältnisses kommen. Auf Grund der beiden positiv verlaufenen Versuche im Sand soll zunächst das Eintiefungsverhältnis R_e und dann die Zeitfunktion hinsichtlich Eintiefung geprüft werden. Als Bedingungen gelten die gleichen wie bei den ersten beiden Versuchen.

Bei den gegebenen Bedingungen einer ungehinderten Eintiefung kann auch hier für jeden Versuch eine ansteigende Regressionsgerade gezeichnet werden. Gleich wie bei den anderen Verhältniswerten kommt es in den verschiedenen Zeiten zu keiner Änderung der Verhältniszahlen, die ähnlich den in der Natur gemessenen Werten sind. Im Falle des Sandversuchs wird die Eintiefungsrate mit der Zeit etwas geringer (Zunahme der Denudation mit wachsender Eintiefung).

Fast proportional dazu verläuft der Abtrag, der beim Modellversuch 110 cm^3/min beträgt, was einem Flächenabtrag pro Minute von 0,6 mm entspricht. Die Eintiefungsgeschwindigkeit wächst mit der Ordnung in einer geometrischen Reihe an (Abb. 4). Sie beträgt für die 1. Ordnung 0,195 mm/min, für die 2. O. 0,434 mm/min, für die 3. O. 1 mm/min und für die 4. O. 2,240 mm/min.

Die Steigung der Regressionsgeraden des Eintiefungsverhältnisses gibt also gleichzeitig den Verhältniswert für die Steigerung der Eintiefungsgeschwindigkeit an. Beim Modellversuch zeigte sich, daß die Eintiefungsgeschwindigkeit in den ersten 5 Minuten eine leicht stärkere Progression aufweist als in den späteren Stadien, wo die Gerade gering weniger ansteigt. Die Abweichung ist aber auffallend gering.

Wesentlichstes Ergebnis erscheint die Tatsache, daß das Eintiefungsverhältnis gleichzeitig die Eintiefungsgeschwindigkeit in der Zeiteinheit angibt und somit vor Augen führt, daß innerhalb eines Rinnensystems Rinnen von 5 m Tiefe und solche von über 200 m das gleiche Entwicklungsalter haben können. Falls also junge Rinnensysteme datiert werden können und gleiche Bildungsbedingungen zu älteren Rinnensystemen bestehen, kann damit deren Bildungszeit bei gegebenen Bedingungen ermittelt werden. Das Eintiefungsverhältnis besteht bei den früher genannten Randbedingungen sowohl bei Rinnensystemen der Natur als auch bei solchen im Labor; die nur geringe Abweichung der Steigung der Regressionsgeraden zwischen jungen und ausgereifteren Systemen wird dabei vom Laborversuch auf die Natur übertragen. Schwierig gestaltet sich allerdings der Nachweis der gleichen Bildungsbedingungen, denn Änderungen in der Vegetation und im Klima verursachen meist auch eine Störung des früheren Gleichgewichtszustandes und führen zur Bildung andersgearteter Entwässerungssysteme; es kann also zu Überlagerungen von Typen von Entwässerungssystemen kommen mit Bildung von neuen Gerinnenetzen anderer Flußdichte (A. N. STRAHLER 1958, S. 296). Im allgemeinen unterscheiden sich die verschiedenen Systemtypen nur wenig voneinander, nur in krassen Fällen kommt es zu wesentlichen Wandlungen in der Gestalt der Rinnensysteme auf Hängen. Die auffälligsten Wandlungen von Rinnensystemen in

einer Gebirgsregion wie den Ostalpen sind wohl da zu beobachten, wo Gletscher während der Kaltzeit die höher gelegenen Rinnen beseitigten und damit das Rinnen-Rippen-Relief verwischten; nur die stärker eingetieften Äste konnten sich erhalten, bzw. wurden nur etwas umgestaltet. Im Bereich der Spuren glazialer Erosion findet man ganz deutlich von dem weitabständigeren Netz der Tiefenlinien abgesetzte junge Rinnensysteme. Auch durch natürliche oder künstliche Verschiebungen der Waldgrenze, vor allem durch Almbetrieb und Viehweide werden Änderungen im Wasserhaushalt des Bodens, in der Stabilität des Untergrundes und in den Auswirkungen verschiedenster klimatischer Einflüsse bewirkt, was in vielen Fällen zur Neubildung von Entwässerungssystemen führt. Vor der Klassifizierung von Rinnensystemen ist es daher notwendig, eine Abgrenzung verschiedenartiger Systeme zu bewerkstelligen. Eine Klassifizierung zweier andersartiger Rinnensysteme gemeinsam muß sich auch durch auffällige Änderungen der Regressionsgeraden äußern.

Die Hangform übt einen wesentlichen Einfluß auf die Gestaltung von Rinnensystemen aus. Die Auswirkungen, welche Hangneigung und Hangform auf Rinnensysteme ausüben, können ebenfalls durch das Studium von Laborversuchen, wo Niederschlag und Substrat gleichgeschaltet sind, analysiert werden.

Bei steigendem Hangwinkel (Bilder 5, 6) kommt es zu einer Streckung der Entwässerungslinien und zu einer Vergrößerung der Rinnendichte. Bei 34° Neigung wird bereits wesentlich mehr Material in der Zeiteinheit von den oberen Hangpartien entnommen als bei 30° , was auf den Unterhängen zu einer weitaus stärkeren Materialbelastung und damit Murenbahnenbildung unter verminderter Eintiefung führt. Versuche mit einem konvexen Hang (oben 10° Neigung, unten 30° Gefälle bei derselben Fläche von 37 mal 50 cm) zeigten, daß die Rinnen hier ein besonders geringes Breitenwachstum anstreben und die Rinnendichte besonders hoch liegt. Interessant scheint hier die Untersuchung bezüglich des Eintiefungsverhaltens der Rinnen auf den beiden Hangvorformen. Abb. 5 veranschaulicht, wie enorm groß die Eintiefung (maximale mittlere Eintiefung = ca. 25% über der mittleren Eintiefung) am konvexen Hang ist; im Verhältnis zum geraden Hang, der denselben Höhenunterschied überwindet, ergibt sich eine Steigerung der Eintiefung um das Zwei- bis Zweieinhalb-fache. Die gesamte mittlere maximale Eintiefung innerhalb 9 Minuten liegt beim geraden Hang bei 5,1 mm, beim konvexen Hang bei 10,8 mm. Während beim geraden Hang von 20° starke Seitenerosion mit breiteren Talbildungen vorherrscht, schneiden sich die Rinnen beim konvexen Hang fast senkrecht ein, wobei auch für tiefe Rinnen eine große Dichte beibehalten wird. Der Kurvenverlauf zeigt in beiden Fällen unterschiedliche Bilder; beim geraden Hang wird die Normalgefällskurve nachgeahmt, beim konvexen Hang sind auch die Eintiefungskurven anfangs konvex; erst in den späteren Stadien kann nach Abbau der Konvexität entlang der Tiefenlinien das konkave Längsprofil erreicht werden.

Inwieweit dieses Ergebnis auf Naturvorgänge übertragen werden kann, hängt natürlich von den Sandeigenschaften ab. Es zeigt sich bei Versuchen mit dem Feinsand, daß bei Neigungen unter 10° nur mehr ganz feine Wasserkanäle geringe Eintiefungen verursachen und es bei der angewendeten Besprühung nur mehr zu flächenhafter Abspülung kommt; auch bei 20° Neigung

sind die Erscheinungen verminderter Eintiefungsbereitschaft und Breitenwachstum zu bemerken. Weitere Versuche mit verschiedenen großen Konvexitäten bei geringeren Gefällsabstufungen und Vergleichsstudien aus dem Gelände stehen noch offen. Die am Sandversuch gezeigte Eintiefungsbelebung an Konvexitäten kann auch in der Natur weit verbreitet beobachtet werden (S. MORAWETZ 1966, S. 48—70).

L i t e r a t u r

- BÜDEL, J.: Die klima-morphologischen Zonen der Polarländer. In: Erdkunde. 1948, II. S. 22—53.
- DOORKAMP, J. C., KING, C. A. M.: Drainage basins in Numerical analysis in geomorphology and introduction, London, 1971. S. 1—112.
- HAGGET, P., CHORLEY, R. J.: Network Analysis in Geography. London, 1969. 348 S.
- KLOSTERMANN, H.: Zur geomorphometrischen Kennzeichnung kleiner Einzugsgebiete. In: Pet. Mitt. 16, 1970. S. 241—260.
- MORAWETZ, S.: Beobachtungen an Rinnen, Racheln und Tobeln. In: Zeitschr. f. Geomorphologie. 6., 1962. S. 260—278.
- Gebiete besonders starken Formenwandels in den Ostalpen. In: Mitt. Österr. Geogr. Ges. 108, 1966. S. 48—71.
- PRECHTL, H.: Geomorphologische Strukturen. In: Tübinger Geogr. Stud. 1965. 144 S.
- STRAHLER, A. N.: Quantitative analysis of erosional landforms in Physical Geography. New York, 1969, S. 481—497.

Z u s a m m e n f a s s u n g

Für geomorphologische Untersuchungen von Hangrinnen ist der Wert der Eintiefung parallel zum Hang von besonderer Bedeutung. Morphometrische Auswertungen an Naturbeispielen ergaben ähnlich wie bei anderen flußmorphometrischen Verhältniswerten unter Bedingungen ungehinderter Eintiefung eine in geometrischer Reihe wachsende Eintiefung bei jeweils höheren Flußordnungen. Auch Zusammenhänge zwischen Eintiefung und Flußhäufigkeit spiegeln sich auf doppelt logarithmischem Papier in Form von Regressionsgeraden wieder, doch geht infolge der Verschiedenheit der Randbedingungen der einzelnen Beispiele ein eventuell früher vorhandenes anders geartetes Ordnungssystem nicht hervor.

Zum Studium der Entwicklung von Rinnensystemen wurden geeignete Feinsandflächen in Laborversuchen besprüht. Die Überprüfung einiger Verhältniswerte ergab Übereinstimmung mit den Werten der Natur, auch hinsichtlich des Eintiefungsverhältnisses; das bedeutet, daß die Eintiefung in der Zeiteinheit mit höher werdender Ordnung in einer geometrischen Reihe wächst; überträgt man das Ergebnis des Sandversuchs auf die Natur, so ist das Eintiefungsverhältnis in den ersten Entwicklungsstadien etwas größer als in den späteren Zeitabschnitten, die Eintiefung erfolgt also nicht ganz linear in der Zeiteinheit sondern schwächt sich später etwas ab. Dies gilt natürlich nur im Rahmen völlig gleichbleibender Bedingungen. Große Modifikationen an Rinnensystemen treten auch im Gefolge von Neigungsänderungen des Gesamthanges und von Krümmungen im Hangprofil zutage und können bei gleichen anderen Randbedingungen gut am Laborversuch analysiert werden.

S u m m a r y

Morphometric studies of runway systems by means of laboratory experiments

For geomorphological investigation of slope-channels the value of engraving parallel to the slope is of particular importance. Morphometric evaluation of natural examples, similar to other values of basin morphometric

ratios under conditions of unchecked engraving, showed increasing engraving in geometric series in respectively higher stream orders. Coherence between engraving (relief) and stream frequency are reflected on logarithmic scales as straight-line regression, but in consequence of different marginal conditions of the different examples, the presence of earlier systems from those at hand did not emerge.

For the study of stream systems an inclined area of fine sand was sprinkled in laboratory experiments. The checking of some ratios showed conformity with those values found in nature, also those concerning relief ratio, this means that a relief of successively higher stream-order increases in given periods according to a geometric series. Comparing the result of the experiments in laboratory to natural conditions, the relief ratio (under laboratory conditions) shows a higher value within the first stages of development than in later periods, the engraving therefore does not take place linearly but decreasingly in later periods. This of course is true only for development under constant conditions. Relevant modifications of stream-systems occur in consequence of changing inclination of the slope and of bending the slope profile, with modifications can easily be analysed in laboratory under constant marginal conditions.

R é s u m é

Recherches morphométriques concernant des systèmes de rigoles à l'aide d'expériences faites au laboratoire

Pour des recherches morphométriques, le degré de creusement parallèle au versant est plus grand intérêt. Une exploitation de mesures morphométriques prises d'exemples en nature sous la condition d'un creusement non entravé eut pour résultat — semblable à d'autres valeurs corrélatives de la morphométrie fluviale — que le creusement progresse correspondent à la complexité augmentant des régimes fluviaux, à mesure d'une série géométrique. On peut reconnaître aussi des corrélations entre la mesure de creusement et la densité du chevelu fluvial (p. ex. en les rendant visibles sur un papier à double échelle logarithmique); mais l'influence de la diversité des autres conditions marginales ne permet pas à reconnaître un autre système d'ordre, efficace peut-être autrefois.

Pour étudier exactement la développement des systèmes de rigoles, on a arrosé, au laboratoire, des plans inclinés de sablons. La comparaison des valeurs corrélatives gagnées au laboratoire avec celles gagnées en nature permet à constater des analogies: ce qui veut dire que le creusement progresse, à l'unité du temps, et correspondant à la complexité du régime fluvial, à mesure d'une série géométrique. Quand on adapte le résultat des expériences faites au laboratoire à la réalité naturelle, on doit constater que la mesure de creusement des stades initiaux est un peu plus grande que celle des stades de maturité; le creusement ne progresse donc pas tout à fait linéairement dans l'unité du temps, elle ralentit un peu. Ces valeurs corrélatives ne sont valables qu'au cadre de conditions tout à fait constantes. On peut observer par contre de grandes modifications de systèmes de rigoles par suite de changements de pente du versant tout entier ou par suite de recourbements partiels; quand les autres conditions restent constantes, on réussit très bien à analyser ces modifications aussi au laboratoire.