

## Die Formung und Formungsgeschwindigkeit von Windkantern in Victoria-Land, Antarktis

Von Franz-Dieter Miotke \*

**Zusammenfassung:** Die vegetationsfreien Oberflächen in der Antarktis sind einer starken äolischen Formung ausgesetzt. Die Windgeschwindigkeiten erreichen oft über 100 km/h. Deflation und Windschliff sind daher für die Haangformung wesentliche Faktoren. Fließendes Wasser ist auf den Hängen des Süd-Victoria-Landes dagegen nur örtlich und zeitlich sehr begrenzt wirksam.

Windkanalexperimente zeigten, daß Windkanter in wenigen Dekaden oder maximal einigen Jahrhunderten in den Dry Valleys entstehen können. Die jährlichen Korrosionsraten betragen maximal einige Millimeter pro Jahr. Größere Unterschiede ergeben sich jedoch durch die jeweilige Lage im Mikorelief und durch petrographisch bedingte Resistenzunterschiede. Die Bedeutung von Eiskristallen (Schnee) für den Windschliff sollte nicht überschätzt werden.

**Summary:** Antarctic land surfaces in South Victoria Land, all without a covering of vegetation, are actively formed by winds which often reach velocities of more than 100 km/h. Consequently, deflation and abrasion are essential factors in the process of slope formation. Water erosion, active only during the very short summer period, is limited to a few localities in South Victoria Land.

Experiments in a wind tunnel proved that ventifacts in the Dry Valleys can be formed within a few decades or at the most, a few centuries. Yearly corrosion rates average around a maximum of a few millimeters. Considerable variability is caused by the different exposures of ventifacts within the micro relief and the varying resistance of the rocks. The importance of ice crystals (snow) for abrasion processes should not be overestimated.

Die sogenannten Oasen in den eisfreien Gebieten der Antarktis zeichnen sich durch große Trockenheit, Vegetationslosigkeit und extrem tiefe Temperaturen aus. Der anfallende feinkörnige Verwitterungsschutt kann äolisch leicht transportiert werden. Die Windgeschwindigkeiten sind in der Antarktis häufig sehr hoch und erreichen nicht selten extrem hohe Werte.

Nach CAILLEUX (1967) betragen die Durchschnittsgeschwindigkeiten an der Küste 22 m/sec. Maximale Windgeschwindigkeiten wurden an der russischen Station Mirnyi (93° E) mit 62 m/sec entsprechend 226 km/h und bei Kap Denisan (142° E) mit 87 m/sec entsprechend 320 km/h (!) gemessen, d. h. die höchsten Windgeschwindigkeiten, die — abgesehen von Tornados — bisher auf der Erde gemessen wurden.

Die verwehten Partikel schleifen die Gesteine an ihrer Oberfläche an. Es entstehen örtlich Polituren auf den Gesteinsoberflächen und Dreikanter. In der Literatur wird häufig vorausgesetzt, daß die Formung von Dreikantern in der Antarktis ein sehr langsamer Prozeß ist und somit das Vorhandensein von Windkantern auf alte bis sehr alte Landoberflächen schließen läßt. Diese Aussage wird durch morphologische Untersuchungen jedoch nicht bestätigt.

---

\* Prof. Dr. Franz-Dieter Miotke, Geographisches Institut der Universität, Schneiderberg 50, 3000 Hannover.

Die Windkanalversuche wurden 1978 im Geomorphologischen Labor der Katholischen Universität Leuven, Leitung Prof. Dr. J. Deploey, durchgeführt. Herrn Deploey sei auch an dieser Stelle für seine technische Unterstützung und die zahlreichen sehr fruchtbaren Diskussionen herzlich gedankt. Herr Poesen assistierte bei den Windkanalexperimenten.

Die Untersuchungen wurden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft finanziell unterstützt. Die Geländearbeiten in der Antarktis wurden 1976/77 in Kooperation mit der amerikanischen National Science Foundation durchgeführt, der nochmals für ihre logistische Hilfe gedankt sei.

## DIE WINDKANTER UND STEINPFLASTER IN DEN DRY VALLEYS

Fast alle Oberflächen, die nicht im anstehenden festen Gestein ausgebildet sind, besitzen ein Steinpflaster, das dicht darunter liegendes Feinmaterial vor der Auswehung schützt (Abb. 1). Die Schuttstücke brechen die schnellen Luftbewegungen im bodennahen Bereich so stark, daß hier nur bei ganz besonders starken Stürmen Gesteinsbewegungen stattfinden. An den Hängen regeln sich selbst bei geringer Hangneigung die Längsachsen der Schuttstücke entsprechend dem Hanggefälle ein.

Die Sanddrift schleift alle Gesteine an, die aus der bodennahen Zone geringer Luftbewegung herausragen. Große Blöcke und freie Gesteinsoberflächen anstehenden Gesteins

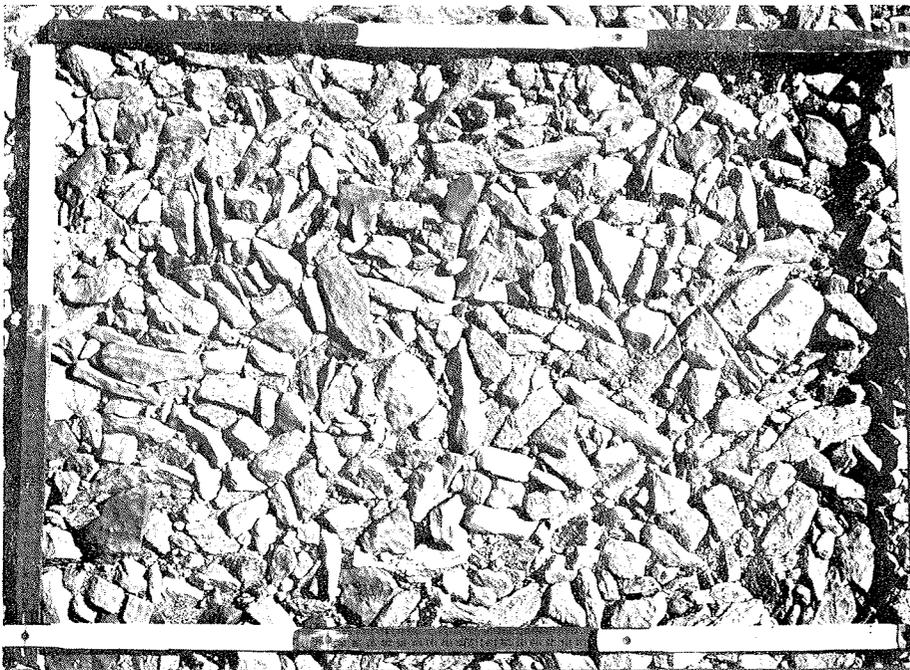


Abb. 1: Steinpflaster in den Dry Valley, durch die das darunterliegende Feinmaterial vor der Auswehung geschützt wird.

Fig. 1: Stone pavements in the Dry Valleys, protecting the underlying fine-grained material against deflation.

werden angeschliffen oder poliert, so daß örtlich abgerundete, walrückenartige Formen entstehen (Abb. 2). Die Hauptstromlinien der Luft, die über den Stein streicht, werden als Tiefenlinien herauspräpariert. Die Richtung, aus der die dominante Schlifffwirkung kommt, ist klar Westen. Es sind also die katabatischen Winde, die besonders intensiv in den Wintermonaten wehen. Die westexponierten Steinseiten sind daher stark angeschliffen.

In einigen Talbodenbereichen sind Sandanwehungen, örtlich auch Dünenfelder, zu beobachten. Die Sandanreicherungen sind jedoch nicht überall zu beachten; sie sind vielmehr auf einige wenige Täler beschränkt. Nur hier kommen größere Dünenfelder vor. Bei-

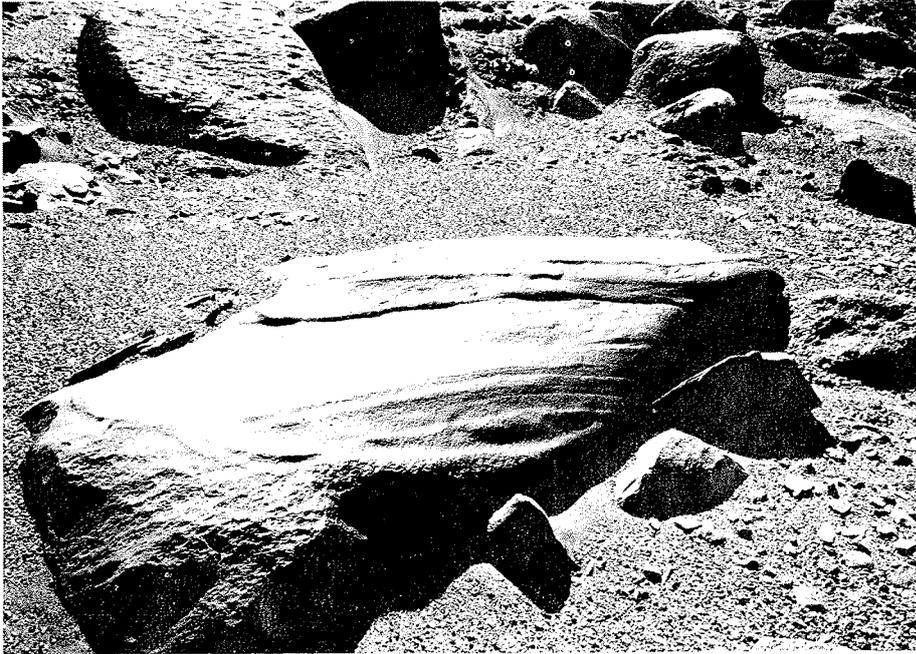


Abb. 2: Durch Sanddrift angeschliffener und polierter größerer Block in den Dry Valleys.  
Fig. 2: Larger-sized block in the Dry Valleys, rounded and polished by sand abrasion.

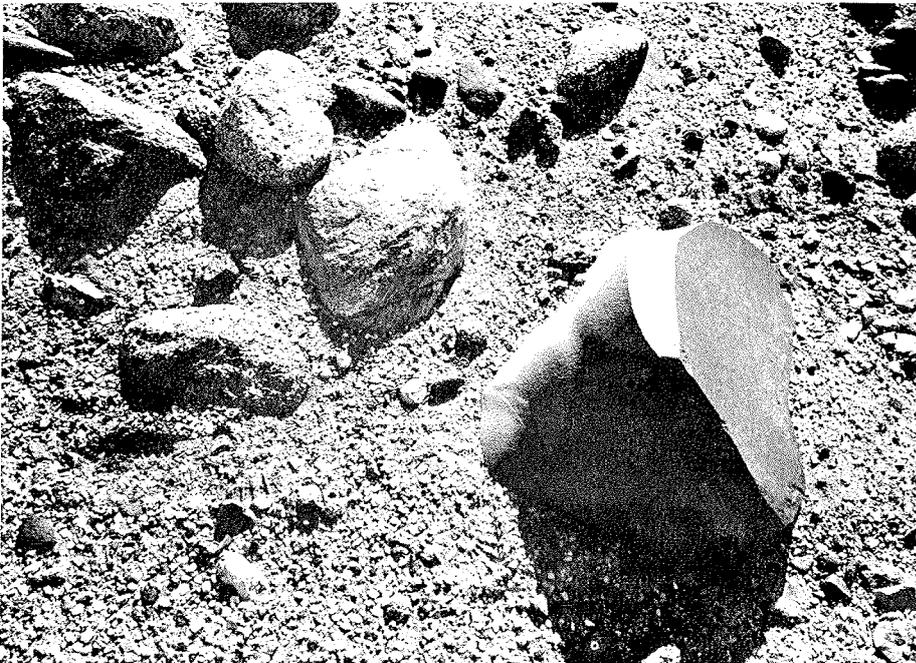


Abb. 3: Windkanten in den Dry Valleys. Zu erkennen ist der Unterschied zwischen der westexponierten stark abgeschliffenen Seite und der kaum angeschliffenen Bruchfläche, die nach Osten zeigt.  
Fig. 3: Ventifact in the Dry Valleys. Note that the east-facing slope of the broken rock is hardly polished at all.

spiele dieser Art lassen sich besonders im Victoria Valley finden, aber auch im Taylor Valley sind einige Dünen entwickelt.

Der Windschliff ist auf engstem Raum sehr unterschiedlich. Zum einen liegt das in der unterschiedlichen Resistenz der Gesteine begründet, zum anderen ergibt sich zwischen den Blöcken eine lokale Strömungsdynamik, die manche Gesteinspartien besonders erfaßt (z. B. Düsenwirkung), andere dagegen in relative Ruhezonen bringt. Die Luft wirbelt um die Hindernisse herum, wobei sich oft skurrile kleine Einschnedungen ergeben. Beim direkten Aufprall auf den Stein werden die Oberflächen oft glatt abgeschritten und bilden am Rande scharfe Grate. In Abb. 3 ist besonders der Unterschied zwischen der westexponierten stark abgeschliffenen Seite und der kaum angeschliffenen Bruchfläche, die nach Osten zeigt, zu erkennen.

Der durch Korrasion und Deflation bedingte Abtrag ist schwer quantitativ zu fassen und örtlich sehr unterschiedlich. Die reliefbedingt festgelegten Luftströmungen wirken manchenorts stark abtragend, während nahebei kaum etwas durch den Wind bewirkt wird. Die in das Gestein hineingearbeiteten Auskolkungen sind ähnlich wie die Lösungsformen im Kalkstein ausgebildet (Abb. 4). Auch hier zeigen die Steilseiten der Hohlformen in



Abb. 4: In das Gestein hineingearbeitete Auskolkungen; die Steilseiten der Hohlformen zeigen in Richtung der fließenden Luft.

Fig. 4: Scallop forms caused by sand abrasion; their scarps in the direction of the predominant wind direction.

Richtung der fließenden Luft. Diese Mikroformen sind ein Anzeiger für die vorherrschende Windrichtung, die für die Formgebung entscheidend war. Im Gegensatz zu der Annahme von HEIM (1887) lassen sich somit doch Rückschlüsse auf die vorherrschende Windrichtung ziehen.

## FRAGESTELLUNG UND ZIELSETZUNG DER WINDKANALVERSUCHE MIT WINDKANTERN AUS DER ANTARKTIS

Bisher gibt es nur sehr wenige Arbeiten über die Entstehung von Windkantern, die mehr als Beschreibungen und Vermutungen bieten. Für die besonderen Verhältnisse in der Antarktis fehlen entsprechende Studien noch völlig. Lediglich Beschreibungen der Formen und Fundlokalitäten existieren bereits. Es gilt daher die Frage zu untersuchen, wie schnell Windkanter in den Dry Valleys entstehen können und wie hoch das Mindestalter der vorhandenen Windschliffen ist.

Um die durchschnittliche jährliche Erniedrigung von windüberschliffenen Gesteinsoberflächen zu errechnen, ist eine Abschätzung der Zeitdauer des wirksamen Windschliffs notwendig. Dafür sind zahlreiche Faktoren zu berücksichtigen:

1. Wie lange pro Jahr wehen Winde, die stark genug sind, um Sand zu verdriften?
2. Wie hoch ist die durchschnittliche Windgeschwindigkeit und wie oft kommen hohe Windgeschwindigkeiten vor?
3. Wie lange sind die Oberflächen schneefrei und damit möglichen Sanddriften ausgesetzt?
4. Wieviel Sand wird bei starken Stürmen über den Boden gefegt?
5. Wie lange im Jahresgang steht lockeres, nicht durch Feuchtigkeit oder gefrorenes Wasser zementiertes Feinmaterial als „Korrasionswaffe“ zur Verfügung?

Diese Fragen sind nicht eindeutig zu beantworten. Durchschnittsgeschwindigkeiten, die zumeist am Ort der Windkanterentstehung gemessen wurden, lassen keine direkt vergleichbaren Aussagen zu. Viel entscheidender sind auch hier die Ausnahmesituationen, wenn sehr starke Stürme in kurzer Zeit mehr Korrasion und Deflation verursachen als in den längeren Zwischenräumen mit „normalen Bedingungen“. Wir wissen auch hier nichts über die Schwellenwerte, die zum Erreichen besonders effektiver Windwirkung überschritten werden müssen. Außerdem sind die speziellen lokalen Besonderheiten zu berücksichtigen, die zu einer sehr unterschiedlichen Abtragungsrate führen.

Beim Versuch, diese Faktoren abzuschätzen, soll für unsere Untersuchungen und Berechnungen die streng einzuhaltende Richtlinie gelten, alle Wirkungsfaktoren niedriger als in der Natur (Antarktis) anzusetzen. Somit wird auf jeden Fall eine Überschätzung der äolisch bewirkten Abtragungsraten vermieden.

Es wurde daher 1. eine Windgeschwindigkeit im Windkanal gewählt, die wesentlich geringer war als die der winterlichen Stürme in den Dry Valleys. Die Menge der vom Luftstrom des Windkanals transportierten Sandkörner wurde 2. gegenüber den natürlichen Transportraten, die für die benutzte Versuchsgeschwindigkeit bekannt sind, stark reduziert. Im Gegensatz zu den scharfkantigen Verwitterungspartikeln, die in den Polargebieten entstehen und — äolisch verdriftet — besonders korrasiv sind (Abb. 5), wurden 3. relativ gut gerundete Sandkörner eines Tertiärsandes aus Belgien benutzt.

An dieser Stelle muß noch eine weitere Möglichkeit berücksichtigt werden, die beim Windschliff eine Rolle spielen kann: Es ist dieses das Abschleifen durch windverdriftete Eiskristalle. Eiskristalle werden in der Literatur häufig in Erwägung gezogen, obwohl es bisher keine Untersuchung über dieses Problem gibt. Gehen wir dieser Frage nach, so kommen wir zu folgendem Ergebnis: Aus den bekannten Tatsachen über Schneekristalle läßt sich relativ leicht ableiten, daß der Anteil der Korrasion durch Schnee-(Eis) kristalle nur gering sein kann.

Die Eiskristalle, die sich bei den niedrigen Temperaturen in der Antarktis zumeist als Platten ausbilden, verlieren schon nach wenigen Tagen Schneedrift ihre ursprüngliche

Form und werden stark abgerundet (s. LISTER 1960). Die Partikeldurchmesser liegen zwischen 0,01 bis ca. 1 mm Durchmesser. Somit haben die Eiskristalle von „Eissand“ nur ein geringes Gewicht (wenige Milligramm bis unter 0,5 g), das auf die Gesteinsoberfläche aufschlägt und korradieren kann. Die Dichte der Eiskristalle beträgt etwa 0,914 bis 0,917 g/cm.

Die Härte der Eiskristalle hängt von der Temperatur ab; nach SHUMSKII (1964: 39/40) ergeben sich folgende Werte:

Temperatur	Mohsche Härte	das entspricht der Härte von
nahe 0° C	1,5	
—15° C	2 bis 3	Gips (2) Kalkspat (3)
—30° C	3 bis 4	
—40° C	4	Flußspat
—78,5° C	6	Feldspat
	7	Quarz
	9	Korund
	10	Diamant



Abb. 5: Oberhalb der Sandfraktion liegendes feinkörniges Verwitterungsmaterial. Das Streichholz (3 cm) kann als Maßstab dienen.

Fig. 5: Fine-grained weathered rock material from above the sand fraction (match to give scale is 3 cm long).

Die geringe Partikelgröße der verdrifteten Eiskristalle, ihr geringes Gewicht, ihre geringe Härte sowie die runde Form der Eiskörner lassen keinen besonders starken Windschliff erwarten. Wenn nicht ein weiterer Faktor wirkt, der bisher übersehen wurde, muß an-

genommen werden, daß auch in extrem kalten Polargebieten wie der Antarktis der Anteil der Windkorrasion mittels Eispartikel nur gering einzuschätzen ist. Es bleibt jedoch abzuwarten, welche Ergebnisse Experimente zu dieser Frage erbringen werden.

#### DIE VERSUCHSANORDNUNG DER WINDKANALEXPERIMENTE

BAGNOLD (1954) gibt an: „... movement of sand is a purely surface effect, taking place only within a metre of the ground... it is clearly possible to reproduce in the laboratory the complete phenomena of sanddrifting...“ Auf eine ausführliche Beschreibung des für die im folgenden beschriebenen Experimente benutzten Windkanals (vgl. Abb. 7) soll hier verzichtet werden.

##### *Versuchsbeschreibung*

Im Mittelteil des Windkanals befindet sich eine Plexiglaskammer, in die der zu untersuchende Windkanter unter einem bestimmten Winkel gestellt wurde. In etwa 40 cm Entfernung vor dem Stein wurden je Versuch etwa 9 l Sand langsam und gleichmäßig (Laufzeit ca. 1–1,5 h) durch einen teilweise verschlossenen Schlauch eingegeben. Die herabfallenden Sandkörner wurden teilweise schon in der Luft, teilweise vom hier etwas erhöhten Boden (Brettrampe) auf die Oberfläche des jeweiligen Windkanters geblasen. Beim Auftreffen auf die Gesteinsoberfläche prallten die Sandpartikel ab, wurden hoch-

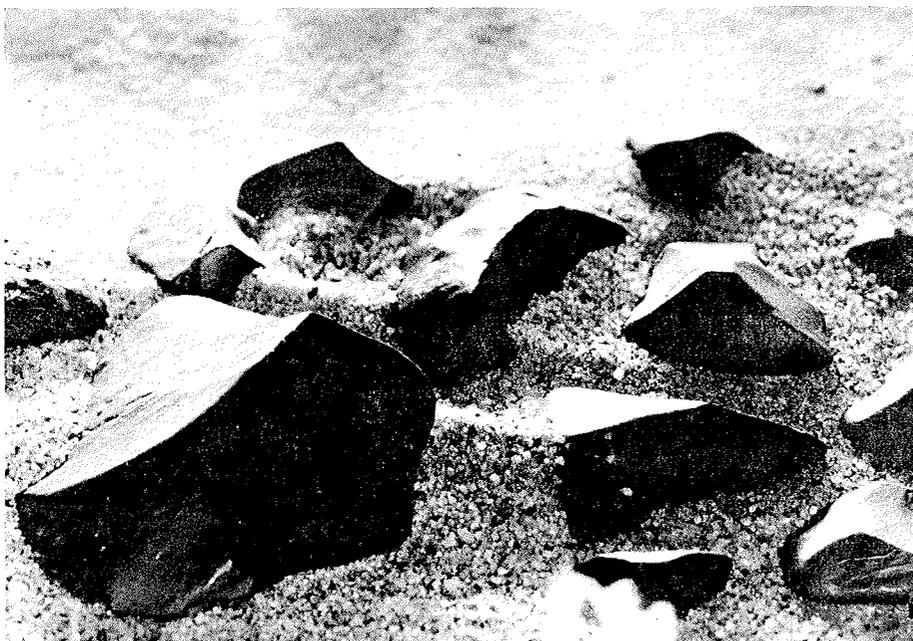


Abb. 6: Zum Studium der Sandbewegungen in einem Sandbett im Windkanal arrangierte Kollektion von Windkantern aus den Dry Valleys.

Fig. 6: Ventifacts from the Dry Valleys arranged in a wind tunnel for the study of the air flow and grain transport.

geschleudert und zumeist in einer Flugbahn über den Windkanter getrieben oder seitlich am Stein vorbeigeleitet. Vor der Aufprallfläche tanzten die Sandkörner, und zahlreiche Körner wurden noch ein zweites Mal auf den Stein geweht, ehe sie schließlich nach hinten in den Windkanal entschwanden. Es konnte aus nächster Nähe beobachtet und gefilmt werden, wie die Partikel auf die Gesteinsoberfläche aufprallten, z. T. zurückgeschleudert wurden oder auch auf dem Windkanter entlangrutschten oder rollten.

Eine Kollektion von Windkantern aus den Dry Valleys, die in einem Sandbett im Windkanal arrangiert wurden (Abb. 6), um die Sandbewegungen über und durch die Steine zu beobachten und zu filmen. Der durchtransportierte Sand wird zeitweise an bestimmten Stellen akkumuliert und schützt dort vorübergehend die Gesteine vor der Korrasion. Der Transport, die sich bildenden Luftströmungen und letztlich auch die Korrasion auf den Windkanterflächen verändern sich jeweils — z. T. entscheidend — mit den unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten.

Es konnte beobachtet werden, wie die Luft um die Steine herumgeleitet wurde, so daß die Sandkörner die Windkanter nicht ausschließlich von vorn trafen. Windkanter werden vielmehr auch seitlich, quer zur Windrichtung und örtlich auch von hinten geformt. Die Sandkörner werden vom Wind ruckartig über den Boden getrieben, prallen auf das Hindernis der Gesteinsoberfläche und springen hoch oder gleiten/rollen an der Windkanterfläche entlang. Das Herausbrechen und Zerkratzen der Gesteinsoberfläche führte im Laufe der Zeit zur Korrasion. Dabei werden entsprechend der Strömungsdynamik bestimmte Bereiche des Steins bevorzugt und daher schneller herausgeschliffen. Je steiler das Hindernis in die bewegte Luft hineinragt, um so abrupter ist der Aufprall der Sandkornmasse. Da die Geschwindigkeit mit dem Quadrat in die Formel eingeht ( $m \cdot 2 \cdot v^2$ ), ergibt sich eine rapide Steigerung der Korrasion mit höheren Windgeschwindigkeiten. Ist die Aufprallfläche flacher geneigt, so wird nicht die gesamte Bewegungsenergie an der Aufprallstelle umgesetzt. Das Sandkorn gleitet an der Gesteinsoberfläche ab. Dieses wird aber nur bei wirklich geglätteten Oberflächen eintreten. Rauhe Strukturen bilden für die heranschließenden Sandkörner genügend Nischen und überhängende Mikroformen, die das Sandkorn abfangen können. Der wirkliche Aufprallwinkel ist nicht gleich dem Neigungswinkel der Windkanterfläche.

Aufgrund der geringen Gesteinshärte und der rauhen Oberfläche sind die Korrasionsraten auf Marmoroberflächen besonders groß; die Gesteinsoberflächen im Marmor sind im Taylor Valley daher immer rau und abgerundet. Der grobkristalline Marmor wird auch durch andere Verwitterung stark angegriffen, Salzsprengung und Frostverwitterung lassen ihn vergrusen.

#### *Die Versuchsbedingungen*

Die gewählte Windgeschwindigkeit im Windkanal betrug in 2 cm Höhe über dem Boden 7 m/sec oder 25 km/h, was einer Windgeschwindigkeit in 10 m Standardhöhe von fast 50 km/h oder 25 knots entspricht.

Die Sandmenge, die mit der Luft verdriftet wurde, betrug  $q_s = 120 \text{ kg/m} \cdot \text{h}$  oder  $0,12 \text{ ton/m} \cdot \text{h}$ . Nach BAGNOLD (1954:70) wäre dieses einer Sandmenge gleichzusetzen, die in der Wüste einer relativ geringen Windgeschwindigkeit in 1 m Höhe von ca. 10 m/sec (36 km/h) entsprechen würde. Der Anstieg des in Bewegung gesetzten Sandes mit der Zunahme der Windgeschwindigkeit ist enorm, weil die Geschwindigkeit zur dritten Potenz eingeht. Auf eine nähere Erläuterung der Formel kann unter Hinweis auf BAGNOLD

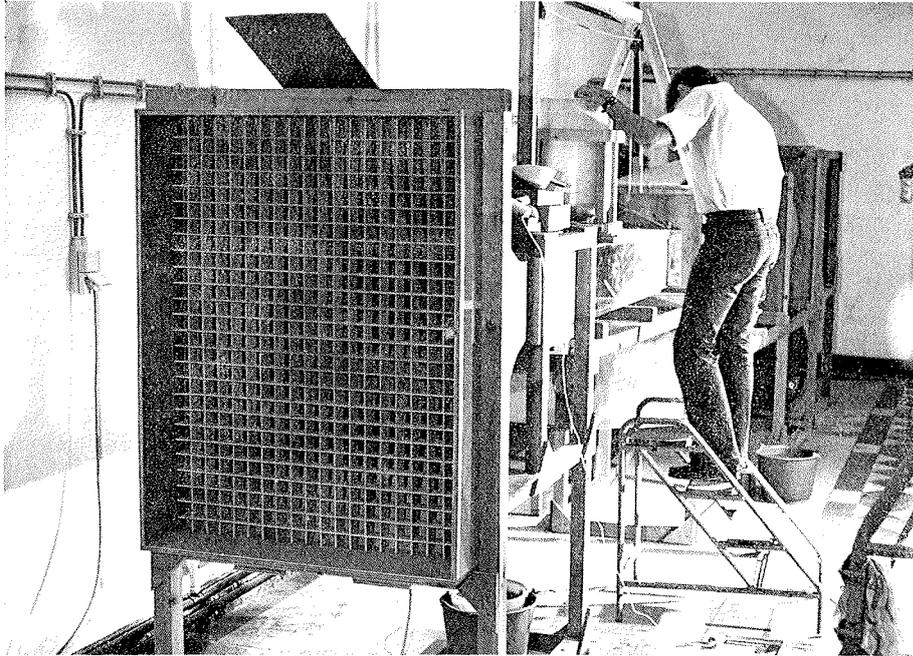


Abb. 7: Der für die Experimente benutzte Windkanal im Geomorphologischen Labor der Universität Leuven.  
 Fig. 7: Wind tunnel used for experiments in the Geomorphological Laboratory at the University of Leuven.

(1954) verzichtet werden. Die Korngrößenzusammensetzung des benutzten Sandes (Quarzsand) ist aus Abb. 8 zu ersehen.

Als Versuchsobjekte dienen originale Windkanter aus den Dry Valleys der Antarktis mit unterschiedlicher Petrographie. Es wurde mit folgenden Gesteinen experimentiert:

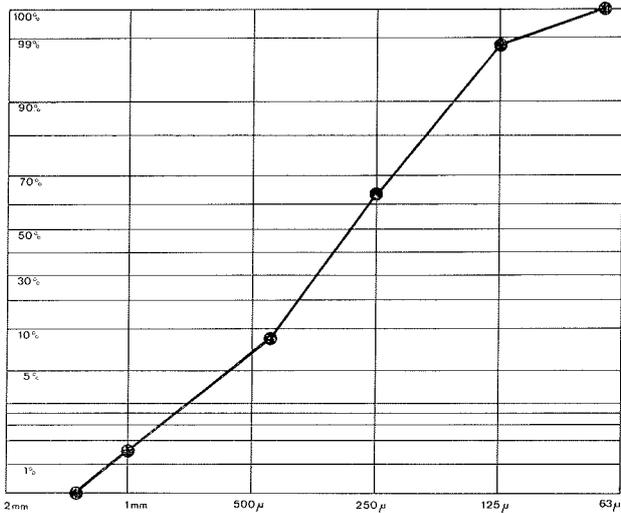


Abb. 8: Die Korngrößen des im Windkanal benutzten Sandes.

Fig. 8: Grain size distribution of sand used during wind tunnel experiments.

Sandstein, Marmor, Pegmatit, Dolorit, Ganggestein. Nach dem Durchgang der entsprechenden Sandmenge wurde der Stein entstaubt und auf einer Analysenwaage gewogen. Der Gewichtsverlust wurde in Relation zur angeschliffenen Oberfläche und der Zeitdauer des Anschliffs gesetzt.

*Windschliffversuche mit einem Sandsteinwindkanter (relativ feinkörnig, dichte Struktur)*

Der Stein wurde gespalten, so daß dem Sandstrahl eine frische Bruchstelle ausgesetzt wurde. Die erzielte Korrosion gleicht damit der initialen Phase des Anschliffs im Gelände. Die Bruchstelle wurde dem Sandstrahl fast senkrecht entgegengestellt. Die Größe der Versuchsfläche betrug 13,5 cm<sup>2</sup>, das Gewicht 43,0 g.

Laufzeit min.	Gew.- verlust in mg	entspr. mg/h	entspr. mg/cm <sup>2</sup> · h	entspr. Volum.- verlust mm <sup>3</sup> / cm <sup>2</sup> · h	entspricht einer oberflächlichen Erniedrigung von					Mittel mm/Jahr
					mm/h	mm/Tag	mm/ Woche	mm/ Monat	mm/ Jahr	
25	2,6	6,2	0,46	0,18	0,0018	0,043	0,30	1,29	15,5	16,7
30	2,9	5,8	0,43	0,17	0,0017	0,041	0,29	1,23	14,8	
30	4,0	8,0	0,59	0,23	0,0023	0,055	0,38	1,65	19,8	

Tab. 1: Gewichts- und Volumenverlust sowie oberflächliche Erniedrigung während der Windschliffversuche mit einem Sandsteinwindkanter.

Tab. 1: Weight and volume loss as well as surface subsidence during abrasion experiments using a sandstone ventifact (finegrained, dense structure).

*Windschliffversuche mit einem Pegmatitwindkanter (sehr grobe Kristallstruktur, große Feldspäte)*

Der Stein wurde gespalten, die Bruchfläche wurde annähernd senkrecht in den Sandstrom gebracht. Die Größe der Bruchfläche betrug 26,96 cm<sup>2</sup>, das Gewicht 53,4 g.

Zu Beginn des Windschliffs auf einer frisch gebrochenen Fläche ist die Korrosion stärker (Abb. 9). Wahrscheinlich werden lose, angebrochene Gesteinsstückchen herausgerissen,

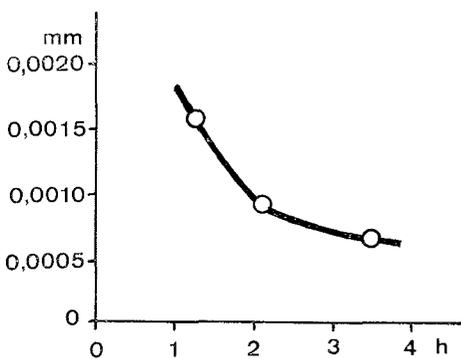


Abb. 9: Die Veränderung der Korrosionsrate (mm/h) im Verlauf des Windschliffversuchs mit einem Pegmatitwindkanter.

Fig. 9: Changing abrasion rate per hour during an abrasion experiment using a pegmatite ventifact.

ehe nur noch der Abschleif der festen Gesteinsmaterie möglich ist, der offensichtlich langsamer verläuft.

Laufzeit min.	Gew.- verlust in mg	entspr. mg/h	entspr. mg/cm <sup>2</sup> · h	entspr. Volum.- verlust mm <sup>3</sup> / cm <sup>2</sup> · h	entspricht einer oberflächlichen Erniedrigung von					Mittel mm/Jahr
					mm/h	mm/Tag	mm/ Woche	mm/ Monat	mm/ Jahr	
70	11,9	10,2	0,38	0,15	0,0015	0,036	0,25	1,08	12,96	8,28
60	5,8	5,8	0,22	0,08	0,0008	0,019	0,13	0,57	6,84	
75	5,5	4,3	0,16	0,06	0,0006	0,014	0,10	0,42	5,04	

Tab. 2: Gewichts- und Volumenverlust sowie oberflächliche Erniedrigung während der Windschliffversuche mit einem Pegmatitwindkanter.

Tab. 2: Weight and volume reduction as well as surface subsidence during abrasion experiments using a pegmatite ventifact (coarse structure, big feldspars).

#### Windschliffversuche mit einem Ganggesteinwindkanter (Dolorit)

Dichtes, dunkles Ganggestein, wie es im Nußbaum-Riegel/Taylor Valley in den herausverwitterten Gängen ansteht.

Eine frisch gebrochene Steinfläche wurde annähernd senkrecht in den Sandstrahl gebracht. Die Größe der Fläche betrug 25,6 cm<sup>2</sup>, das Gewicht 167,5 g.

Zum Vergleich wurde die abgeschrägte glatte Seite dieses Windkanters dem Sandstrahl ausgesetzt. Bei diesem dichten Gestein ergab sich praktisch kein großer Unterschied zu den Korrasionswerten einer frisch gebrochenen Fläche.

Laufzeit min.	Gew.- verlust in mg	entspr. mg/h	entspr. mg/cm <sup>2</sup> · h	entspr. Volum.- verlust mm <sup>3</sup> / cm <sup>2</sup> · h	entspricht einer oberflächlichen Erniedrigung von					Mittel mm/Jahr
					mm/h	mm/Tag	mm/ Woche	mm/ Monat	mm/ Jahr	
90	11,3	7,5	0,28	0,11	0,0011	0,026	0,18	0,78	9,36	8,04
75	6,1	4,9	0,19	0,07	0,0010	0,017	0,12	0,51	6,12	
60	6,6	6,6	0,26	0,10	0,0007	0,024	0,17	0,72	8,64	
durch natürlichen Windschliff bereits polierte Fläche des gleichen Windkanters										
60	7,7	7,7	0,30	0,12	0,0012	0,29	0,20	0,87	10,4	

Tab. 3: Gewichts- und Volumenverlust sowie oberflächliche Erniedrigung während der Windschliffversuche mit einem Ganggesteinwindkanter (Dolorit).

Tab. 3: Weight and volume reduction as well as surface subsidence during abrasion experiments using a dolorite ventifact.

#### Windschliffversuche mit einem Marmorstück

Grobkörniger, fast weißer Marmor vom Nußbaum-Riegel, Taylor Valley.

Die Gesteinsprobe wurde in der Antarktis einer geglätteten Marmoroberfläche entnommen (glazial- und windüberschliffen). Die Bruchfläche wurde senkrecht in den Sandstrahl gebracht. Später wurde zum Vergleich die polierte Seite des Gesteinsstückes dem Sandstrahl ausgesetzt. Auf diese abgerundete Gesteinsfläche prallten die Sandkörner örtlich unter flacherem Winkel auf. Zusätzlich wurden zwei weitere Messungen mit flacher Lagerung des Gesteins durchgeführt. Größe der Bruchfläche 52,4 cm<sup>2</sup>, Gewicht 192,4 g. Das Querprofil bei flacher Lagerung ergäbe jedoch nur 14 cm<sup>2</sup> Fläche.

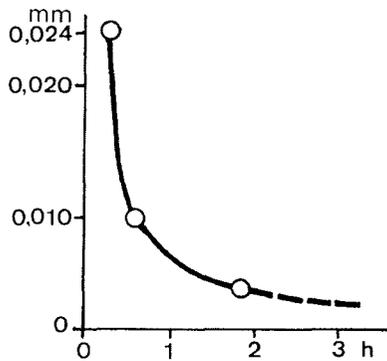


Abb. 10: Die Veränderung der Korrosionsrate (mm/h) im Verlauf des Windschliffversuchs mit einem Marmorstück.

Fig. 10: Changing abrasion rate per hour during an abrasion experiment using marble.

Laufzeit min.	Gew.- verlust in mg	entspr. mg/h	entspr. mg/cm <sup>2</sup> · h	entspr. Volum.- verlust mm <sup>3</sup> / cm <sup>2</sup> · h	entspricht einer oberflächlichen Erniedrigung von					Mittel mm/Jahr
					mm/h	mm/Tag	mm/ Woche	mm/ Monat	mm/ Jahr	
frischer Bruch senkrecht										
15	80,5	322,0	6,14	2,36	0,024	0,58	4,1	17,4	208,8	115,2
20	43,5	130,5	2,49	0,96	0,010	0,24	1,7	7,2	86,4	
70	90,7	77,7	1,48	0,57	0,006	0,14	1,0	4,2	50,4	
polierte Seite senkrecht										
80	46,6	34,9	0,67	0,25	0,0025	0,06	0,42	1,8	21,6	23,4
60	39,3	39,3	0,75	0,29	0,0029	0,07	0,49	2,1	25,2	
polierte Seite flachgelagert										
60	29,0	29,0	0,55	0,21	0,0021	0,05	0,35	1,5	18,0	14,4
60	17,9	17,9	0,34	0,13	0,0013	0,21	0,21	0,9	10,8	

Tab. 4: Gewichts- und Volumenverluste sowie oberflächliche Erniedrigung während der Windschliffversuche mit einem Marmorstück.

Tab. 4: Weight and volume reduction as well as surface subsidence during abrasion experiments using a polished marble ventifact (coarse grained).

Wie zu erwarten, ist die Korrosion auf der Bruchfläche am stärksten. Bei senkrechter Stellung ist die polierte Oberfläche stärker korrodiert als die entsprechende flachgelagerte Gesteinsoberfläche. Bei flacherem Aufprall der Körner ist die Korrosion geringer. Insgesamt ist die Korrosion auf weichem Marmor wesentlich stärker als auf härteren Gesteinen (Abb. 10).

#### VERGLEICH UND DISKUSSION DER MESSERGEBNISSE

Vergleicht man die Werte, die sich bei den gewählten Versuchsbedingungen über einen längeren Zeitraum ergeben würden, so zeichnet sich klar die geringere Gesteinshärte von Marmor ab (Tab. 5).

Korrosionsraten	mm/Jahr	mm/10 Wochen	mm/1 Woche
Marmor	10—200	2—40	0,2—4
Sandstein	15— 20	3— 4	0,2—0,3
Pegmatit	5— 13	1— 2,5	0,1—0,3
Ganggestein (Dolorit)	6— 10	1— 2	0,1—0,2

Tab. 5: Vergleich der Meßergebnisse.

Tab. 5: Comparison of measurement results.

Bei grober Vereinfachung kann man für alle untersuchten Gesteine einen jährlichen Korrasionsbetrag von 5—20 mm/Jahr annehmen, sofern ganzjährig die Laborbedingungen des Windschliffs herrschen.

Diese Werte müssen jedoch nicht genau den wirklichen natürlichen Korrasionswerten, die für die Dry Valleys gelten, entsprechen. Andererseits muß auch berücksichtigt werden, daß auch die anderen Verwitterungsformen gleichzeitig wirken und das Gestein für die äolische Abtragung vorbereiten.

Die wichtigsten Faktoren in den Berechnungen annähernd wirklicher natürlicher Korrasionswerte sind 1. die durchschnittlichen und maximalen Windgeschwindigkeiten sowie 2. die Zeitdauer pro Jahr, in der aktive Sandverdriftung stattfindet.

CALKIN & RUTFORD (1974) berechneten für das Victoria Valley mittlere sommerliche Windgeschwindigkeiten von 13,5 knots in 2 m Höhe. Die Berechnungen basieren auf der Auswertung von Dünenwanderungen und den Dimensionen der in den Dünen beobachteten Rippelmarken. Die wirklichen Windgeschwindigkeiten in den Herbst-, Winter-, Frühjahrsmonaten liegen jedoch mit Sicherheit wesentlich höher. Vor allem dürften die nicht seltenen sehr starken Stürme mit über 100—200 km/h sehr effektiv sein. Auch wenn man die Durchschnittsgeschwindigkeit von 22 m/sec (80 km/h) zugrunde legt, die CAILLEUX (1967) für die Küste angibt — wir befinden uns nur wenige Kilometer von der Küste entfernt —, so ergeben sich wesentlich höhere Windgeschwindigkeiten, als in den Windkanalversuchen benutzt wurden.

Nach KUENEN (1960) nimmt die Korrasion mit der Korngröße, den abnehmenden Zurrundungsgrad der Körner, der Rauheit der Gesteinsoberflächen und der Zunahme der Windgeschwindigkeit zu. Die Schnelligkeit der Windkanterbildung hängt nach KUENEN weitgehend von den Windgeschwindigkeiten ab. Windkanter können in Holland bei mittelstarken Winden in Jahren, bei Sturm in Tagen und bei äußerst starken Winden in Stunden entstehen, wenn der Sand scharfkantig ist. Bei einem Gewichtsverlust durch die Korrasion von wenigstens 6% ist die Form eines Windkanters deutlich erkennbar. Für Hollands Küsten berechnet KUENEN daher ca. 70 Jahre für die Entstehungsdauer eines Windkanters.

Diese Werte — auf die Verhältnisse der Antarktis übersetzt — sprechen auch dort für eine relativ schnelle Windkanterbildung. Dazu ein Rechenbeispiel: Ein rechteckiges Stück Stein mit den Kantenlängen 3 cm Breite, 2 cm Höhe und 6 cm Länge besitzt ein Volumen von  $2 \cdot 3 \cdot 6 \text{ cm} = 36 \text{ cm}^3$ . Bei einer angenommenen Dichte von  $2,6 \text{ g/cm}^3$  ergibt sich ein Gewicht von 93,6 g. 6% Gewichtsverlust genügen nach den Untersuchungen von KUENEN (1960), um die Form eines Windkanters zumindest von einer Seite anzudeuten. 6% von 93,6 g sind 5,6 g, denen  $2,16 \text{ cm}^3$  entsprechen würden. Bei einer Grundfläche von  $18 \text{ cm}^2$  ergeben sich  $2,16 \text{ cm}^3 : 18 \text{ cm}^2 = 0,12 \text{ cm}$  oder 1,2 mm korrasiver Erniedrigung. Dieser Betrag kann örtlich in wenigen Jahren erreicht werden. Sehr ausgeprägte Windkanterformen würden innerhalb von Dekaden, maximal in einigen Jahrhunderten entstehen.

Es bleibt die schwierige Abschätzung, wie lange es im Jahresverlauf zur Sandverdriftung kommt. Da es bekannt ist, daß weite Bereiche der Dry Valleys auch im Winter nicht völlig schneebedeckt sind, müssen wir auch die sturmreichen Wintermonate für die möglichen Korrasionszeiten teilweise mit einbeziehen. Die Schneelosigkeit großer Flächen beruht auf den geringen Schneemengen, die hier fallen, und der Verwehung des sehr trockenen und damit leicht in Bewegung zu setzenden Schnees im Winter. Auch die Sande sind im Winter sehr trocken und damit leicht beweglich zu halten. Im Südsommer 1976/77

konnte der Verf. niemals eine Sandbewegung in den Dry Valleys in den Hangregionen beobachten, obwohl die Windgeschwindigkeiten manchmal 10 m/sec und mehr erreichten. Es spricht alles dafür, daß die Zeit der effektiven äolischen Tätigkeit auf den Winter konzentriert ist, wie es ja auch die westexponierten Anschliffseiten der Windkanter zeigen.

Es dürfte nicht unrealistisch sein, zumindest insgesamt 1—4 Wochen pro Jahr anzunehmen, in denen Sandverdriftung stattfinden kann. Das deuten auch die Dünenbewegungen im Victoria Valley an, die im Mittel von 1959—1962 13 m (das entspricht 4 m/Jahr) gewandert sind (CALKIN & RUTFORD 1974). Daraus würden sich Werte für die Korrasion der Gesteinsoberflächen von wenigen Zehntel Millimeter bis über 1 mm/Jahr ergeben. Der einzig bisher bekannte Wert für die Entstehungsgeschwindigkeit von Windschliff in der Antarktis ist die von EVTEEV (1959) gemachte Beobachtung, daß in den Basalt-Pyramiden, die Mitglieder der deutschen Drygalski-Expedition 1901/1903 errichtet hatten, inzwischen durch Windschliff Hohlräume von 5—7 cm Tiefe erzeugt worden sind. Die 1957, also 55 Jahre nach der Errichtung der Pyramide entdeckten Schliffformen sprechen für eine durchschnittliche Korrasion von 1—1,5 mm pro Jahr. Dieser Wert stimmt mit den aus den Laborversuchen errechneten Daten gut überein.

Schon wenige Wochen im Jahr mit mittleren Windgeschwindigkeiten oder wenige Tage pro Jahr mit sehr hohen Windgeschwindigkeiten würden ausreichen, eine Erniedrigung der Gesteinsoberfläche von 1 bis 2 mm/Jahr zu erreichen. Daraus ergibt sich, daß Windkanter in wenigen Dekaden oder maximal einigen Jahrhunderten in den Dry Valleys entstehen können und keinesfalls als Indikatoren sehr alter Oberflächen herangezogen werden können.

#### Literatur

- Bagnold, R. A. (1941): Physics of blown sand and desert dunes. — London.
- Bather, F. A. (1900): Wind worn pebbles in the British Isles. — Proc. Geologists' Ass. 16: 396—420.
- Bramer, H. (1959): Zur Frage der Windkanter. — Wiss. Z. der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald 7, math.-nat. Reihe 3/4, 1957/58.
- Bryan, K. (1931): Wind worn stones or ventifacts. — Rpt. Comm. Sedimentation 1929/30, Nat. Res. Council Circ. 93: 29—50.
- Cailleux, A. (1967): L'Antarctique. — Paris.
- Cailleux, A. & P. Calkin (1963): Orientation of hollows in cavernously weathered boulders in Antarctica. — Bull. perigl. 12: 147—150.
- Calkin P. E. & R. H. Rutherford (1974): The sand dunes of Victoria Valley. — Geogr. Rev. 64 (2): 189—216.
- Evteev, S. A. (1964): At what speed does wind erode stones in Antarctica? — Soviet. Ant. Expedition Inform. Bull. II: 211.
- Fristrup, B. (1938): Winderosion within the arctic deserts. — Geogr. Tidsskr. 52: 51—65.
- Heim, A. (1888): Über Kantergeschiebe aus dem norddeutschen Diluvium. — Viertelj. Ber. Naturf. Ges. Zürich 32: 383—385.
- Kuennen, Ph. H. (1960): Experimental Abrasion, 4. Eolian action. — J. Geol. 68: 427—449.
- Lindsay, J. F. (1973): Ventifact evolution in Wright Valley, Antarctica. — Geol. Soc. Am. Bull. 84: 1791—1798.
- Lister, H. (1960): Trans-Antarctic Expedition 1955—1958. — Scientific Reports 5, Glaciology 1. Solid Precipitation and Drift Snow, London.
- Schoewe, W. H. (1932): Experiments on the formation of wind-faceted pebbles. — Am. J. Sci. 24: 111—134.
- Shumskii, P. A. (1964): Principles of structural glaciology. — New York.