

6 Morphologische Altersklassifikation von Erosionsrinnen

Aufgrund des „frischen Aussehens“ der Erosionsrinnen wird vermutet, daß diese geologisch gesehen relativ jung sind, wahrscheinlich nicht älter als 1 Million Jahre (*Malin und Edgett, 2000a*). Da auch heute noch Meteoriten und in geringerem Maße auch Kometen auf der Marsoberfläche einschlagen, ist die Überlagerung von kleinen Kratern auf der Oberfläche ein Kriterium, um abschätzen zu können wie alt eine morphologische Einheit auf dem Mars ist. Ein anderes Kriterium zur Altersabschätzung ist, aufgrund der aktiven äolischen Prozesse die Bedeckung von Formen mit Staub bzw. Deflationsspuren. Viele Erosionsrinnen auf dem Mars zeigen Spuren von Degradation oder sind sogar von Kratereinschlägen getroffen worden. Daher wurden die kartierten Erosionsrinnen auf dem Mars in 3 Klassen (erhalten, degradiert und bekratert) eingeteilt und separat ausgewertet, um Hinweise darauf zu finden, inwiefern die klassifizierten Erosionsrinnen sich von der Verbreitung, Exposition und Höhenlage unterscheiden und welche klimatischen Bedingungen zur Zeit ihrer Bildung geherrscht haben könnten.

6.1 Morphologische Klassifikation

Insgesamt wurden die einzelnen 26145 Erosionsrinnen in drei Altersklassen eingeteilt. Die Klassifizierung ergab 15270 (58,4%) erhaltene, 8672 (33,2%) degradierte und 2203 (8,4%) bekraterte Erosionsrinnen. In den folgenden Unterkapiteln wird die Morphologie der unterschiedlichen Klassen anhand von Bildmaterial beschrieben.

6.1.1 Erhaltene Erosionsrinnen

Die Rinnen der Erosionsformen sind frei von Schuttmaterial und die Schwemmkegel überlagern polygonale Formen und kleine transversale Dünen. Da sie zudem nicht von Kratern bedeckt sind, vermutet man für diese Erosionsrinnen aufgrund des „frischen Aussehens“ und der Überlagerungs-Beziehungen ein sehr junges geologisches Alter.

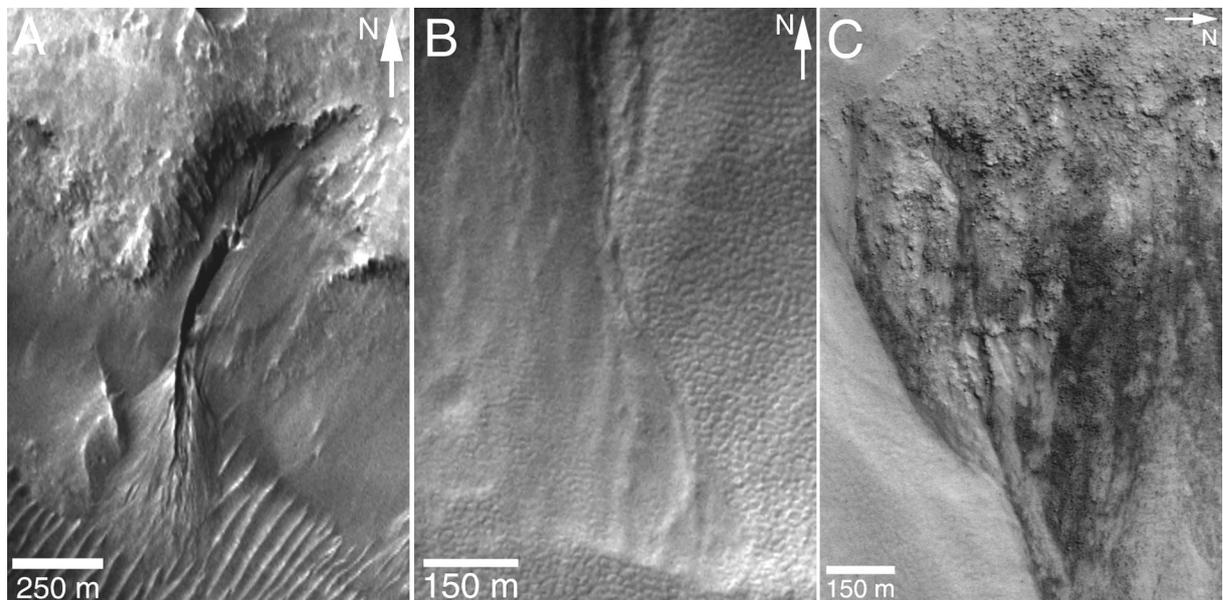


Abb. 65: Erhaltene Erosionsrinnen: (A) Die Schwemmkegel überlagern relativ junge Transversaldünen (MOC M0700752 bei $39,1^{\circ}\text{W}$ und $29,7^{\circ}\text{S}$); (B) Die Schwemmkegel überlagern relativ junge Polygonstrukturen (MOC M0300537 bei $342,8^{\circ}\text{W}$ und $54,96^{\circ}\text{S}$); (C) Die Entstehungszonen dieser Erosionsrinnen weisen keine Staubbedeckung auf (MOC M1100530 bei $15,8^{\circ}\text{W}$ und $65,2^{\circ}\text{S}$).

6.1.2 Degradierete Erosionsrinnen

Degradierete Erosionsrinnen zeigen verschiedene Formen, die darauf hinweisen, daß sie älter sind als die erhaltenen, frisch aussehenden Erosionsrinnen. Zum einen können Formen, dieser Klassifikationsstufe, durch Staubdeposition verfüllt bzw. bedeckt sein und zum anderen lithifizierte und/oder nachträglich erodierte Schwemmkegel aufweisen oder nach der Bildung der Erosionsrinnen durch Entlastungs- oder Spannung entstandene Rißstrukturen, die Rinnen und/oder Schwemmkegel durchschneiden, aufweisen. (Abbildung 66). Im Gegensatz zu den relativ jungen Erosionsrinnen konnten bei den degradiereten Formen vor allem äolische Abtragungs- (Deflation) und Sedimentationsprozesse, die auf dem Mars zu den aktivsten rezenten Prozessen (Staubstürme, Staubteufel und möglicherweise Dünen) gehören, wirksam werden.

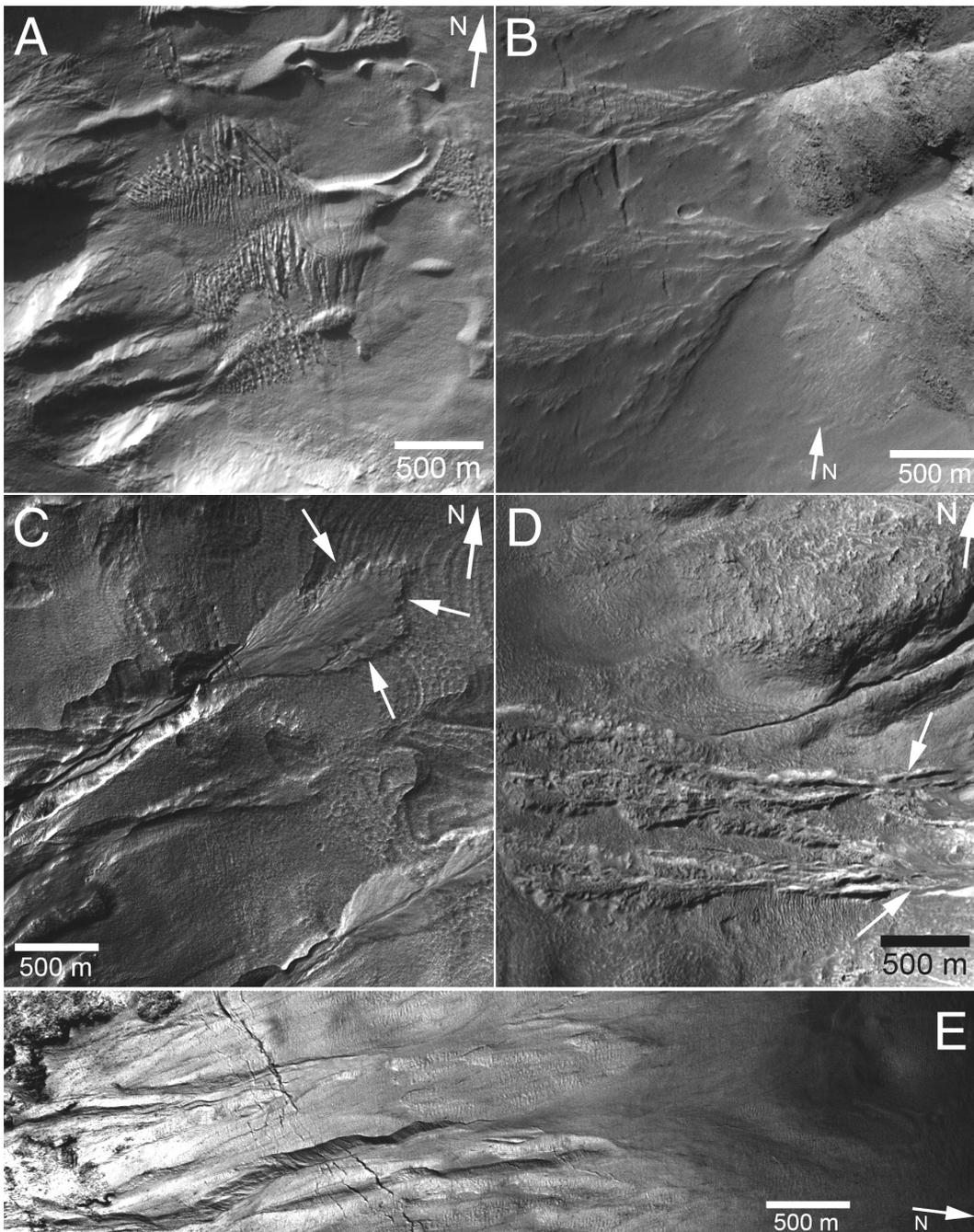


Abb. 66: Degradierete Erosionsrinnen: (A) Yardang-ähnliche Formen, wahrscheinlich durch Deflation verursacht. Die Rinnen sind größtenteils verfüllt (MOC E2101227 bei 75,6°W und 46,2°S); (B) Verfüllte Rinnen und staubbedeckte Schwemmkegel. Teilweise durchschneiden jüngere Risse die Schwemmkegel (MOC M0303743 bei 91,8°W und 49,4°S). (C) Der Schwemmkegel dieser Erosionsrinne scheint lithifiziert zu sein und ist nachträglich, wahrscheinlich durch äolische Prozesse, an den Rändern (weiße Pfeile) erodiert worden (MOC E1202671 bei 326,8°W und 51,2°S); (D) Verfüllte Rinnen (weiße Pfeile) und lithifizierte Schwemmkegel (MOC E0101240 bei 83°W und 45,2°S). (E) Verfüllte Rinnen und jüngere Risse, die die Erosionsrinnen durchschneiden (MOC E1000635 bei 30,5°W und 52,4°S).

6.1.3 Bekraterte Erosionsrinnen

Erosionsrinnen, die Kratereinschläge auf Alkoven, Rinnen oder Schwemmkegeln aufweisen, wurden als „bekraterte Erosionsrinnen“ klassifiziert. Die Überlagerung von Kratern auf Oberflächen zeigt deutlich, daß diese im Gegensatz zu den „erhaltenen Erosionsrinnen“ relativ alt sein müssen. Die bekraterten Erosionsrinnen weisen neben den Kratereinschlägen auch die gleichen Degradationserscheinungen auf wie die degradierten Erosionsrinnen. Da die degradierten Erosionsrinnen oftmals starken Erosions- und auch Sedimentationsprozessen ausgesetzt waren und damit auch Kratereinschläge ausgelöscht worden sein könnten, gehören die degradierten und bekraterten Erosionsrinnen möglicherweise einer Klasse an.

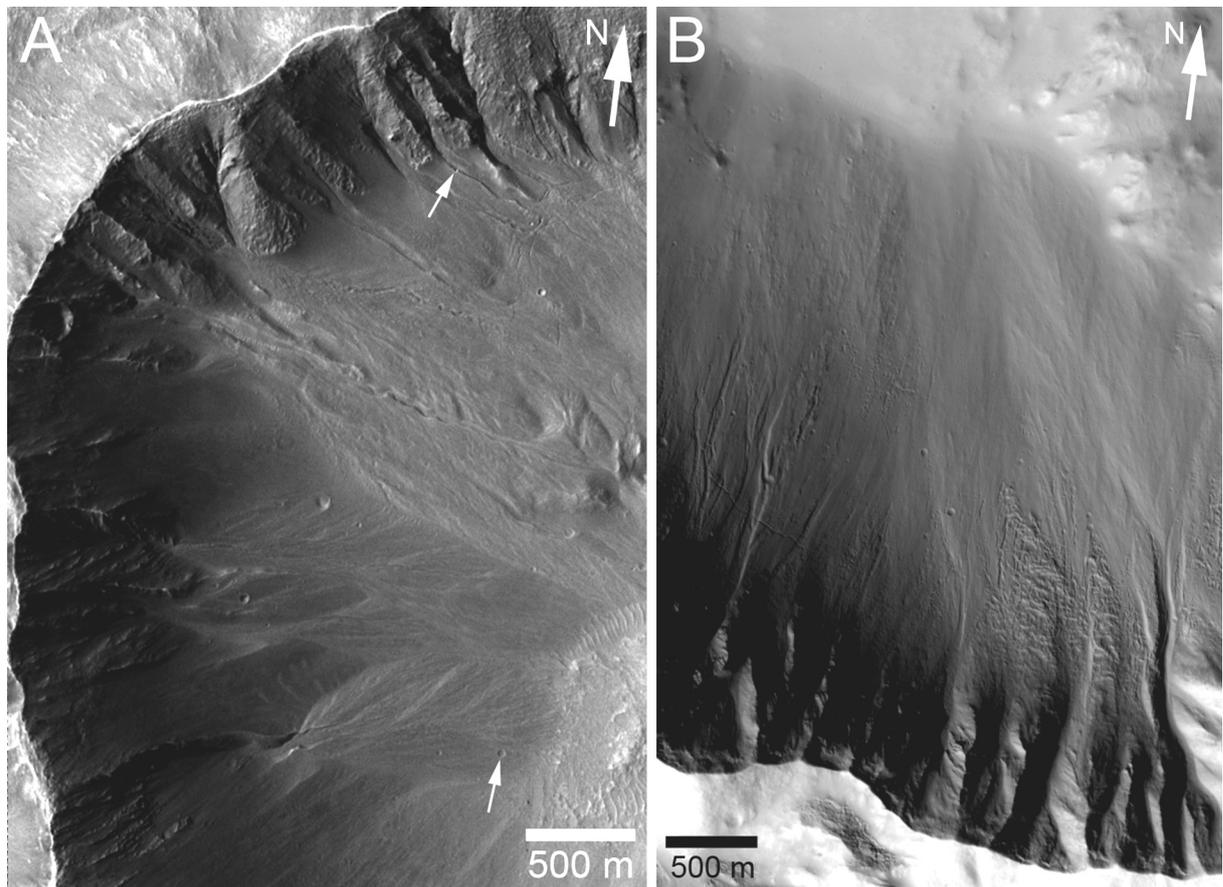


Abb. 67: Bekraterte Erosionsrinnen: (A) Die Schwemmkegel (weisser Pfeil, unten) und auch eine Rinne (weisser Pfeil, oben) sind von Kratern überlagert. Die Erosionsrinnen weisen zudem Degradationserscheinungen (Verfüllung, Risse) auf (MOC E1202857 bei 211,2°W und 35,7°S); (B) Der gesamte Hang wie auch die Rinnen und Schwemmkegel der Erosionsrinnen sind von Kratereinschlägen übersät. Auch hier sind die Rinnen verfüllt (MOC M0307688 bei 61,1°W und 44,4°N).

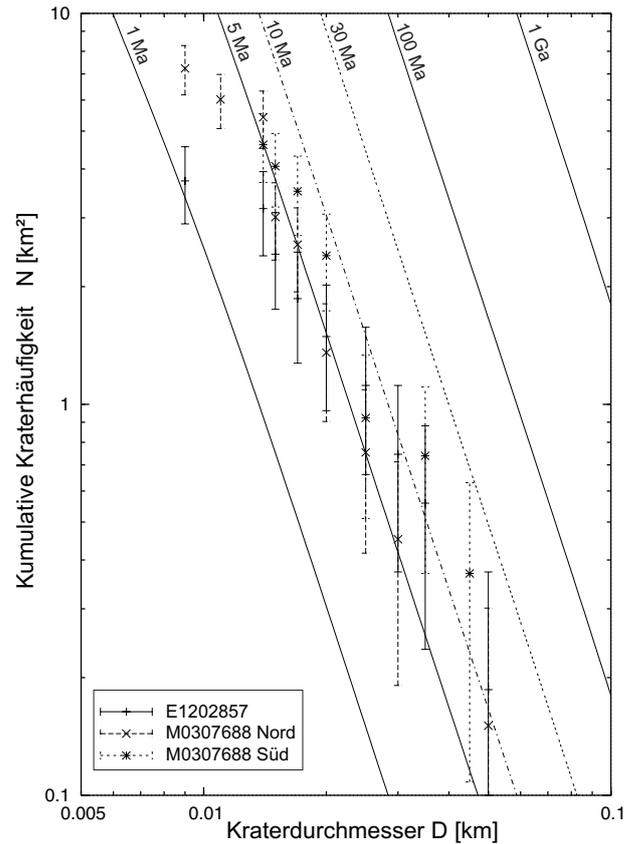


Abb. 68: Ergebnisse der Altersabschätzungen von bekraterten Erosionsrinnen.

Bildnummer	Breitengrad	Längengrad (W)	Bildauflösung (m/pxl)	Zählfläche (km ²)	Modellalter (Mio. Jahre)
E1202857	-35,7	210,9	4,39	5,37	8,1
M0307688 Nord	44,4	60,9	4,64	6,64	5,2
M0307688 Süd	44,3	60,8	4,64	5,42	7,2

Tab. 12: Ergebnisse der Altersabschätzungen von bekraterten Erosionsrinnen

Kraterzählungen auf den kleinskaligen Erosionsrinnen sind schwierig, da der Fehler der Kraterhäufigkeitsverteilungen durch einen einzigen größeren Krater verfälscht werden kann und eine zu kleine Fläche vorliegt, um eine signifikante Altersbestimmung vornehmen zu können. Für eine ungefähre Schätzung der absoluten Alter sowie einer stratigraphischen Einordnung der bekraterten Erosionsrinnen wurde anhand von drei Regionen (2 MOC-Bilder) die Fläche der Erosionsrinnen (Alkoven, Rinnen und Schwemmkegel) auskartiert und auf diesen Kraterzählungen durchgeführt. Es handelt sich dabei um die MOC-NA Bilder E1202857 (Abbildung 67A) und dem Nord- und Südhang in M0307688 (Abbildung 67B; M0307688 Süd entspricht dem Nordhang). Die ermittelten absoluten Alter liegen zwischen 5,2 bis 8,1 Millionen Jahre (Tabelle 12). Der Fehler dieser Messungen beträgt den Faktor 2 (Hartmann und Neukum, 2001).

6.2 Verbreitung

Die globale Verbreitung der Erosionsrinnen hinsichtlich der morphologischen Altersklassifikation zeigt eine zonale Anordnung der drei Klassen (Abbildung 69). Die bekraterten Erosionsrinnen kommen in beiden Hemisphären zwischen einer Breite von 30° und 50° vor. Die degradierten Erosionsrinnen sind auch in etwas höheren Breiten noch vertreten und kommen in beiden Hemisphären zwischen 30° bis 60° Breite vor. Die erhaltenen Erosionsrinnen sind auf der Südhalbkugel in allen Breitengradbereichen anzutreffen, wohingegen sie auf der Nordhalbkugel in niedrigen Breiten zwischen 30° bis 40° bis auf wenige Ausnahmen nicht, sonst aber über alle Breitengradbereiche vorkommen.

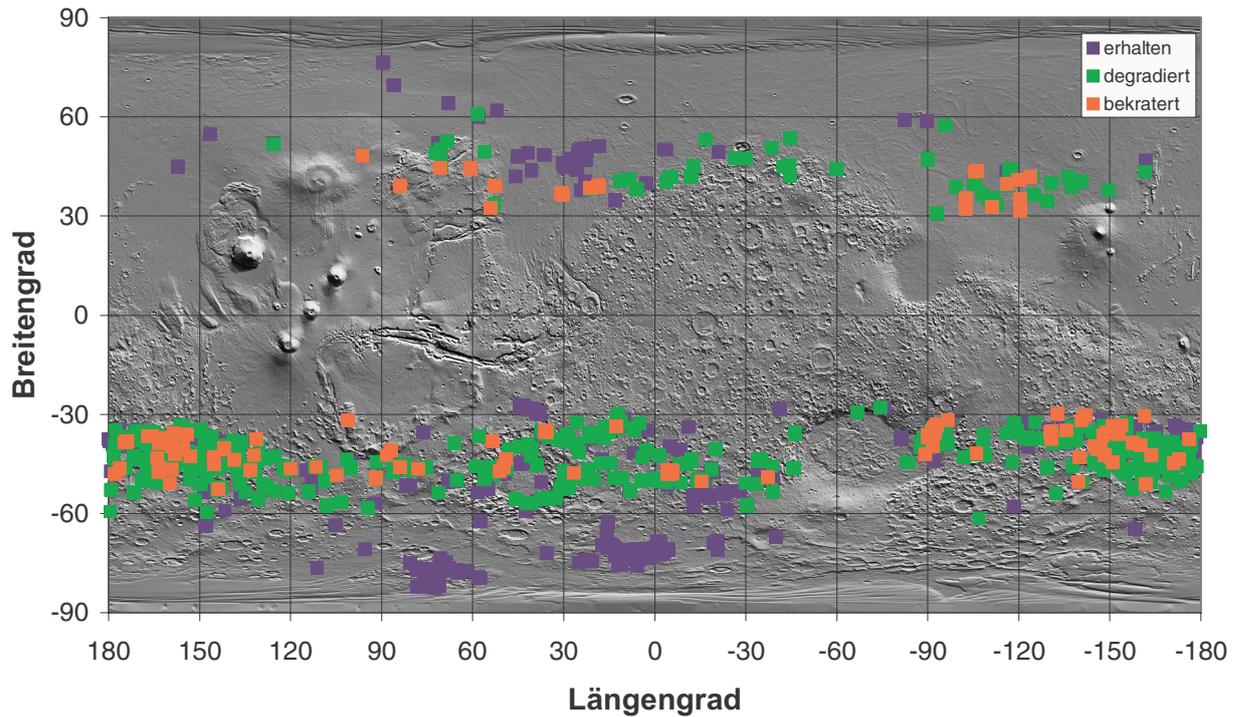


Abb. 69: Globale Verbreitung von erhaltenen, degradierten und bekraterten Erosionsrinnen.

Das zonal sehr unterschiedliche Vorkommen der einzelnen Erosionsrinnen zeigt deutlich die breitengradabhängige Häufigkeit der Erosionsrinnen pro 1000 km^2 (Abbildung 70). Zudem sind in dieser Darstellung die Maxima besser ersichtlicher. Die erhaltenen Erosionsrinnen zeigen auf der Südhalbkugel drei ausgeprägte Maxima bei $37,5^\circ\text{S}$, $54,5^\circ\text{S}$ und $70,5^\circ\text{S}$. Das breitengradabhängige Vorkommen auf der Nordhalbkugel ist hingegen wie auch bei den degradierten und bekraterten Erosionsrinnen in beiden Hemisphären homogener und weist keine ausgeprägten Maxima auf. Deutlich erkennbar sind die zum Äquator fortschreitenden Vorkommen von den erhaltenen über die degradierten bis zu den bekraterten Erosionsrinnen in beiden Hemisphären.

	erhalten Ø Breitengrad (Σ Anzahl)	degradiert Ø Breitengrad (Σ Anzahl)	bekratert Ø Breitengrad (Σ Anzahl)
Nordhalbkugel	52,11°N (618)	41,86°N (917)	38,31°N (485)
Südhalbkugel	58,66°S (14652)	43,16°S (7755)	41,63°S (1718)

Tab. 13: Mittlere Breitengradvorkommen von erhaltenen, degradierten und bekraterten Erosionsrinnen auf der Nord- und Südhalbkugel.

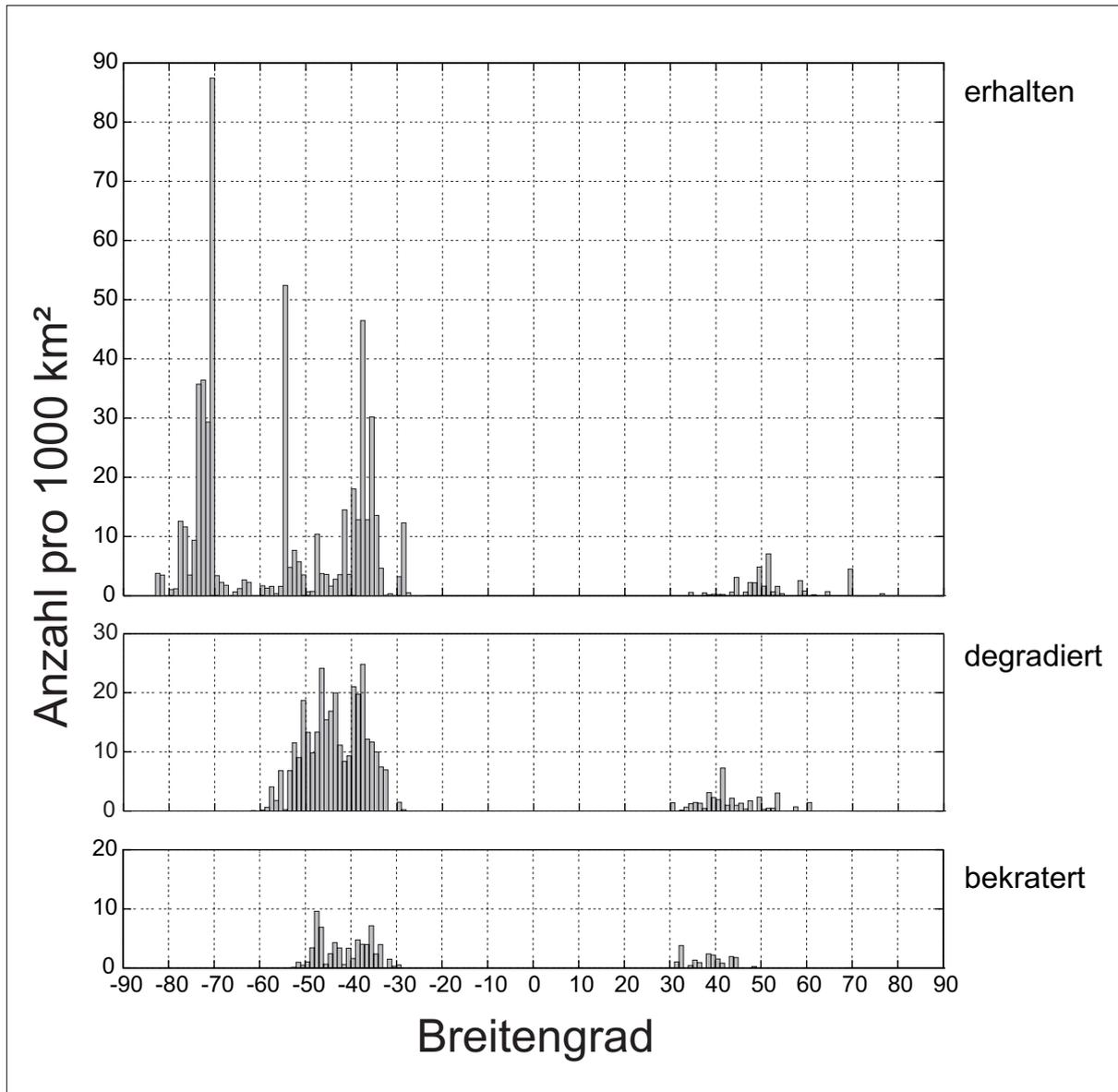


Abb. 70: Breitengradabhängige Häufigkeit von erhaltenen, degradierten und bekraterten Erosionsrinnen.

Die Mittelwerte der breitengradabhängigen Vorkommen (Tabelle 13) zeigen Abweichungen von 10° (Nord) und 15° (Süd) Breite zwischen erhaltenen und degradierten Formen. Die Unterschiede zwischen degradierten und bekraterten Formen betragen demgegenüber nur 2° bis 3° in beiden Hemisphären, was die Vermutung nahe legen könnte, daß sie altermäßig einer Klasse angehören.

6.3 Absolute Höhenlage

Die Höhenlage der Erosionsrinnen ergibt ein differenzierteres Bild bei der Aufschlüsselung nach Klassen, als die Betrachtung aller Formen in Kapitel 5.3.6 (Abbildung 71). Die erhaltenen Erosionsrinnen wurden im Folgenden wegen der großen Anzahl von polaren Formen in zwei Klassen von Erosionsrinnen in mittlere Breiten ($< 65^\circ$) und hohe Breiten ($> 65^\circ$) separiert, um diese mit den degradierten und bekraterten Formen, die nur in mittleren Breiten vorkommen, vergleichen zu können.

Die Maxima der Höhenlagen liegen bei den erhaltenen Erosionsrinnen der mittleren Breiten bei etwa 0 m und denen der polaren Breiten bei etwa 1300 m (Südhalkugel). Die Höhenlagen in den mittleren Breiten umfassen einen Bereich von etwa -1500 m bis 2500 m, wohingegen die Höhenlagen der polaren Breiten sich auf einen engen Höhenlagenbereich zwischen etwa 500 m und 2000 m konzentrieren. In tiefen Lagen von < -2000 m treten, bis auf wenige Ausnahmen und einem kleinen Vorkommen bei etwa -2000 m, keine erhaltenen Erosionsrinnen auf. Die erhaltenen Formen in der nördlichen Hemisphäre weisen Höhenlagen von etwa -4500 m auf. Die degradierten Formen hingegen weisen Höhenmaxima bei etwa 1000 m auf (Südhalkugel), wobei die Verteilung insgesamt etwas homogener ist und keine ausgeprägten Maxima erreicht werden. Die Spannweite der Höhenlagen in der südlichen Hemisphäre konzentriert sich vor allem auf Höhenlagen von etwa -1500 m bis 3500 m. Die gleichen Maxima der Höhenlagen von etwa 1000 m weisen die bekraterten Formen auf. Die Verteilung reicht ebenso von etwa -1500 m bis 3500 m. Hier ist die Verteilung der Höhenlagen aber noch ausgeglichener als bei den degradierten Formen. Im Gegensatz zu den erhaltenen Erosionsrinnen der Südhalkugel (mittlere Breiten), kommen verhältnismäßig viele degradierte und bekraterte Erosionsrinnen in tiefen Lagen von < 2000 m vor. Die Maxima der degradierten und bekraterten Erosionsrinnen auf der Nordhalkugel liegen wie bei den erhaltenen Erosionsrinnen bei etwa -4500 m.

Von besonderem Interesse sind auch hier die Erosionsrinnen in der südlichen Hemisphäre, da eine statistische Auswertung aufgrund der hohen Anzahl der Formen im Gegensatz zur nördlichen Hemisphäre sinnvoll ist. Um die Ergebnisse untereinander vergleichen zu können, wurden die Mittelwerte von erhaltenen, degradierten und bekraterten Erosionsrinnen der mittleren Breiten ($< 65^\circ$) sowie der polaren ($> 65^\circ$), ausschließlich erhaltenen Formen, aus Höhenlagen zwischen -1500 bis 7000 m errechnet (Tabelle 14). Zum einen entsprechen diese Höhenbereiche der Topographie des südlichen Hochlands (mit Ausnahme weniger Gebiete von Argyre und Hellas, in denen Erosionsrinnen vorkommen), zum anderen werden die Ergebnisse durch Wegfall der Vorkommen in tiefergelegenen Gebieten, die unverhältnismäßig stark innerhalb der Klassifikation schwanken, vergleichbar.

Die durchschnittlichen Höhenlagen der Erosionsrinnen in mittleren Breiten zeigen eine Zunahme von den erhaltenen (368 m) über die degradierten (786 m) zu den bekraterten (1264 m) Formen. Die polaren, ausschließlich erhaltenen Erosionsrinnen liegen auf einer Höhe von durchschnittlich 1185 m. Ein manuelles Nachmessen in den wenigen Lokalitäten der polaren Senken zeigt eine durchschnittliche Höhe der Entstehungsgebiete zwischen 800 m bis 1000 m. Unter der Voraussetzung, daß die Erosionsrinnen mit Hilfe des Agens Wasser geformt wurden, könnten die Höhenlagen ein Indiz für einen höheren Oberflächendruck zu Zeiten ihrer Bildung sein. Neben der Temperatur ist eine der Minimalvoraussetzungen ein Oberflächendruck von über 6,1 mbar, der unter heutigen Klimabedingungen saisonal in Höhen bis zu etwa 1000 m erreicht wird (s. Kapitel 5.3.6). Ein Großteil der erhaltenen Erosionsrinnen liegt damit in diesem Bereich bzw. in einem Grenzbereich (polare Vorkommen). Die höheren topographischen Lagen der degradierten und bekraterten Erosionsrinnen würden demnach auf Klima mit höheren Drücken zu ihrer Bildungszeit hinweisen.

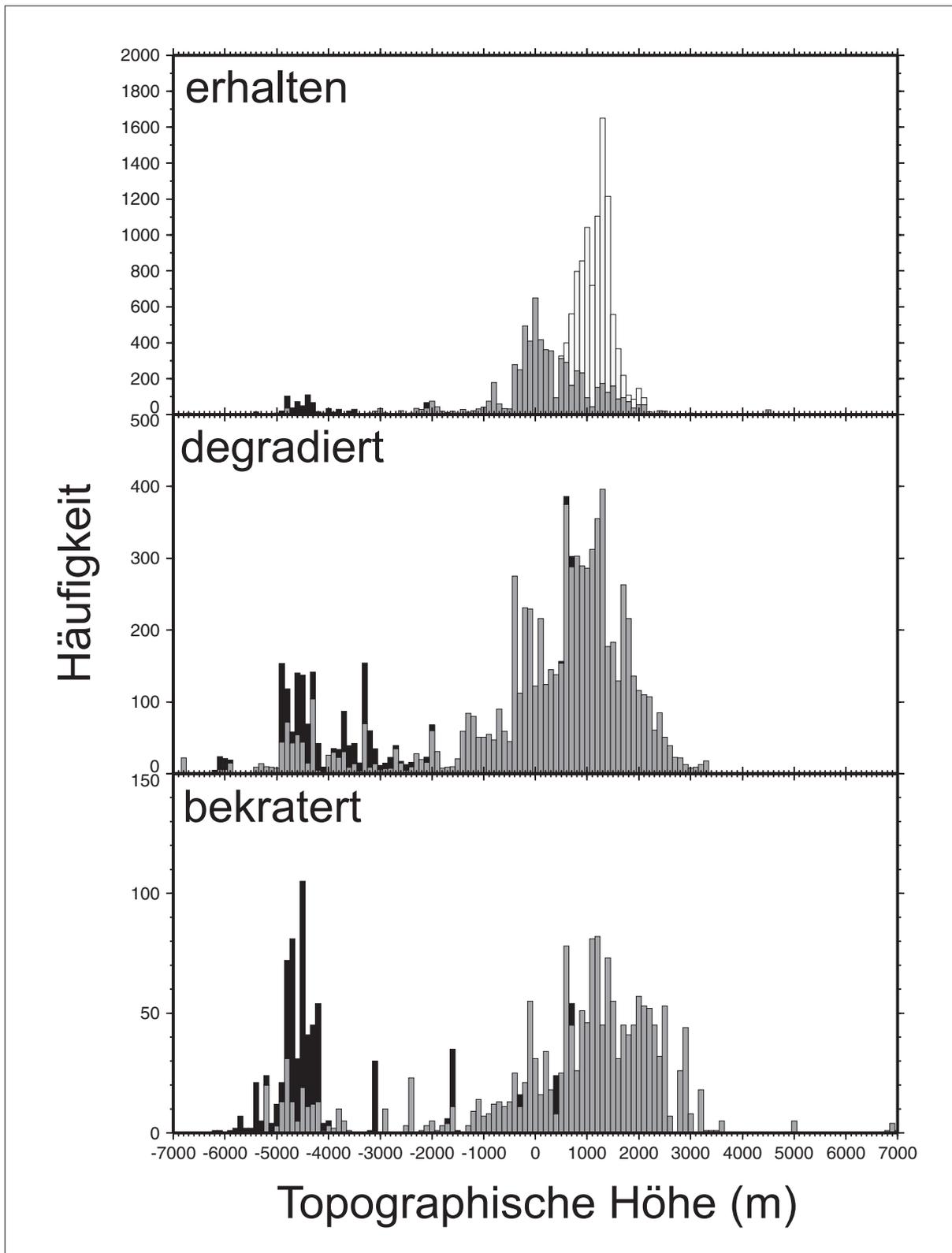


Abb. 71: Häufigkeit der absoluten topographischen Höhe von Quellregionen der klassifizierten Erosionsrinnen (erhalten, degradiert und bekratert). Nordhalbkugel = schwarz, Südhalbkugel (mittlere Breiten bis 65°) = grau und Südhalbkugel (polare Breiten von $> 65^\circ$) = weiß.

	erhalten (polar=> 65°)	erhalten (mittl. Breiten < 65°)	degradiert	bekraterter
Ø Höhe (in m)	1185	368	786	1264
Minimum	240	-1481	-1498	-1310
Maximum	2523	4523	4950	6961
Σ Anzahl	7880	6310	6761	1492

Tab. 14: Mittlere Höhenlagen von erhaltenen, degradierten und bekraterterten Erosionsrinnen auf der Südhalbkugel in einem Höhenbereich von -1500 m - 7000 m.

6.4 Exposition

Die Exposition der einzelnen Erosionsrinnenklassen zeigt unterschiedliche Hauptrichtungen hinsichtlich der Nord- und Südhemisphäre wie auch der drei Klasseneinteilungen (Abbildung 72). Die Exposition in der nördlichen Hemisphäre ist mit süd-östlichen Hauptrichtungen bei den erhaltenen, degradierten und bekraterterten Erosionsrinnen jedoch relativ homogen. In der südlichen Hemisphäre tritt die überwiegende Anzahl der erhaltenen Erosionsrinnen an Süd-exponierten Hängen auf, wohingegen die degradierten und bekraterterten Erosionsrinnen hauptsächlich an Nord-Ost exponierten Hängen vorkommen.

Die Aufschlüsselung der einzelnen Klassen nach Breitengradbereichen zeigt für die Südhalbkugel ein sehr viel differenzierteres Bild (Abbildung 73). Die erhaltenen Erosionsrinnen kommen von 27°S bis 50°S fast ausschließlich an Süd-exponierten Hängen vor, wobei die Ausrichtung nach Süden um so extremer wird je näher die Erosionsrinnen zum Äquator liegen. Zwischen 50°S und 60°S kommen sie an SW-gerichteten Hängen vor, welches vor allem bedingt ist durch die großen Vorkommen im Russell Krater Dünenfeld. In dem Breitengradbereich von 60°S bis 75°S sind hingegen an Nord- und Süd-Hängen gleichermaßen Vorkommen anzutreffen. In diesem Falle zeigt sich, daß die sich von Süd nach Nord erstreckenden MOC-Bildstreifen möglicherweise einen Einfluß auf die Azimut-Auswertung haben und die Nord-Süd Häufigkeiten überinterpretiert sein könnten. Von 75°S bis 83°S ergibt sich mit einer NE-Ausrichtung wiederum eine gänzlich andere Exposition der erhaltenen Erosionsrinnen.

Die degradierten Erosionsrinnen kommen nur in einem Breitengradbereich zwischen 28°S und 60°S vor. Die Hangexposition zwischen 28°S und 40°S weist eine SSE-Hauptrichtung, wohingegen die Expositionen zwischen 40°S und 50°S und 50°S und 60°S NO-Hauptrichtungen aufweisen. Die gleichen Hangexpositionen zeigen die bekraterterten Erosionsrinnen mit einer SSO-Hauptrichtung zwischen 30°S und 40°S und einer NO-Hauptrichtung zwischen 40°S und 52°S.

Diese stark Breitengradabhängige Expositionsverteilung der altersklassifizierten Erosionsrinnen ist teilweise auch lokal zu beobachten. Abbildung 74 zeigt eine Depression im südlichen Hochland bei etwa 354,7°W und 47,9°S. Auf kleinem Raum kommen erhaltene Erosionsrinnen am Süd-exponierten Hang vor, wohingegen bekraterterte (ältere) Erosionsrinnen am Nord-exponierten Hang auftreten.

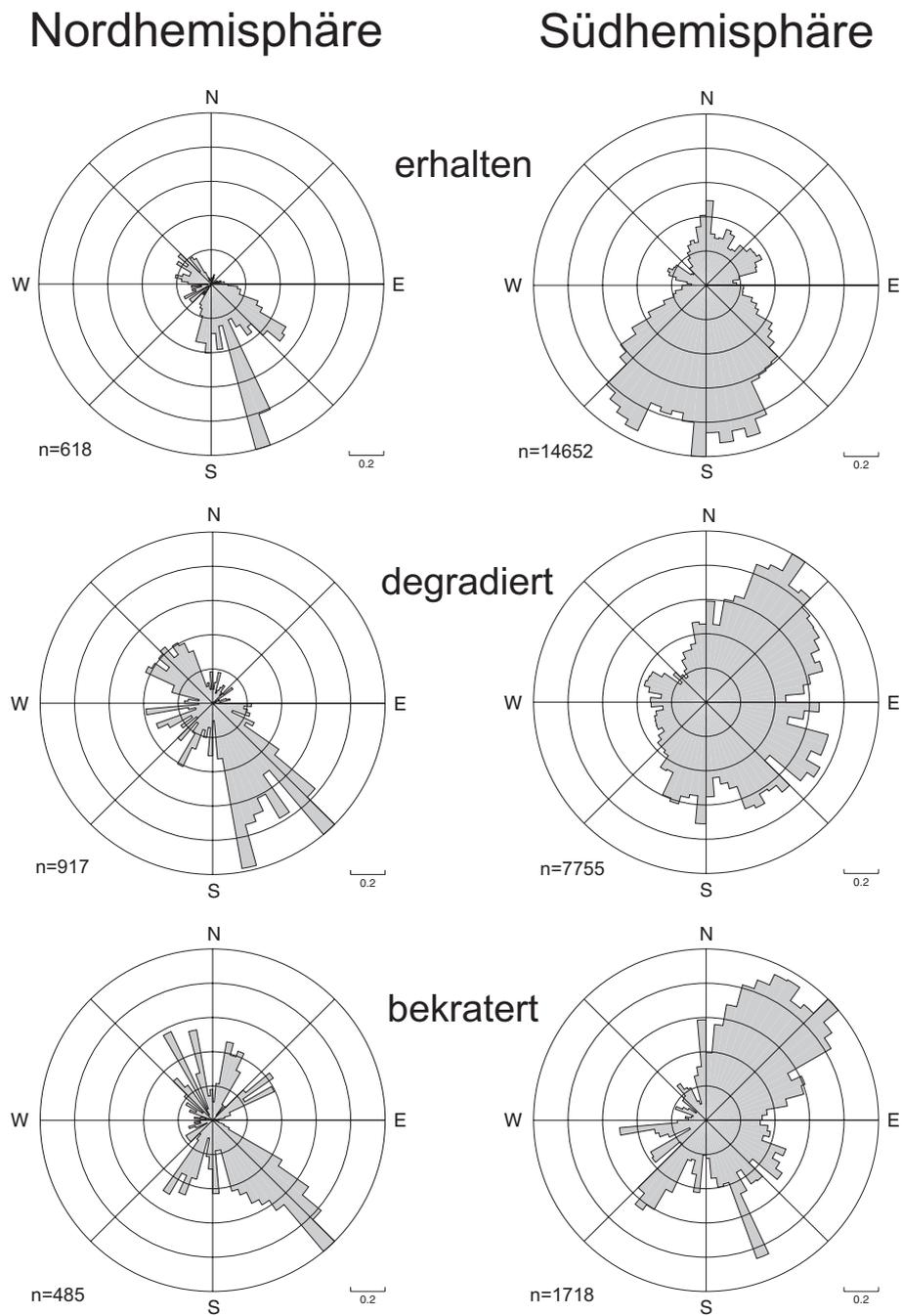


Abb. 72: Azimute der klassifizierten Erosionsrinnen (erhalten, degradiert und bekratert) auf der Nord- und Südhalbkugel.

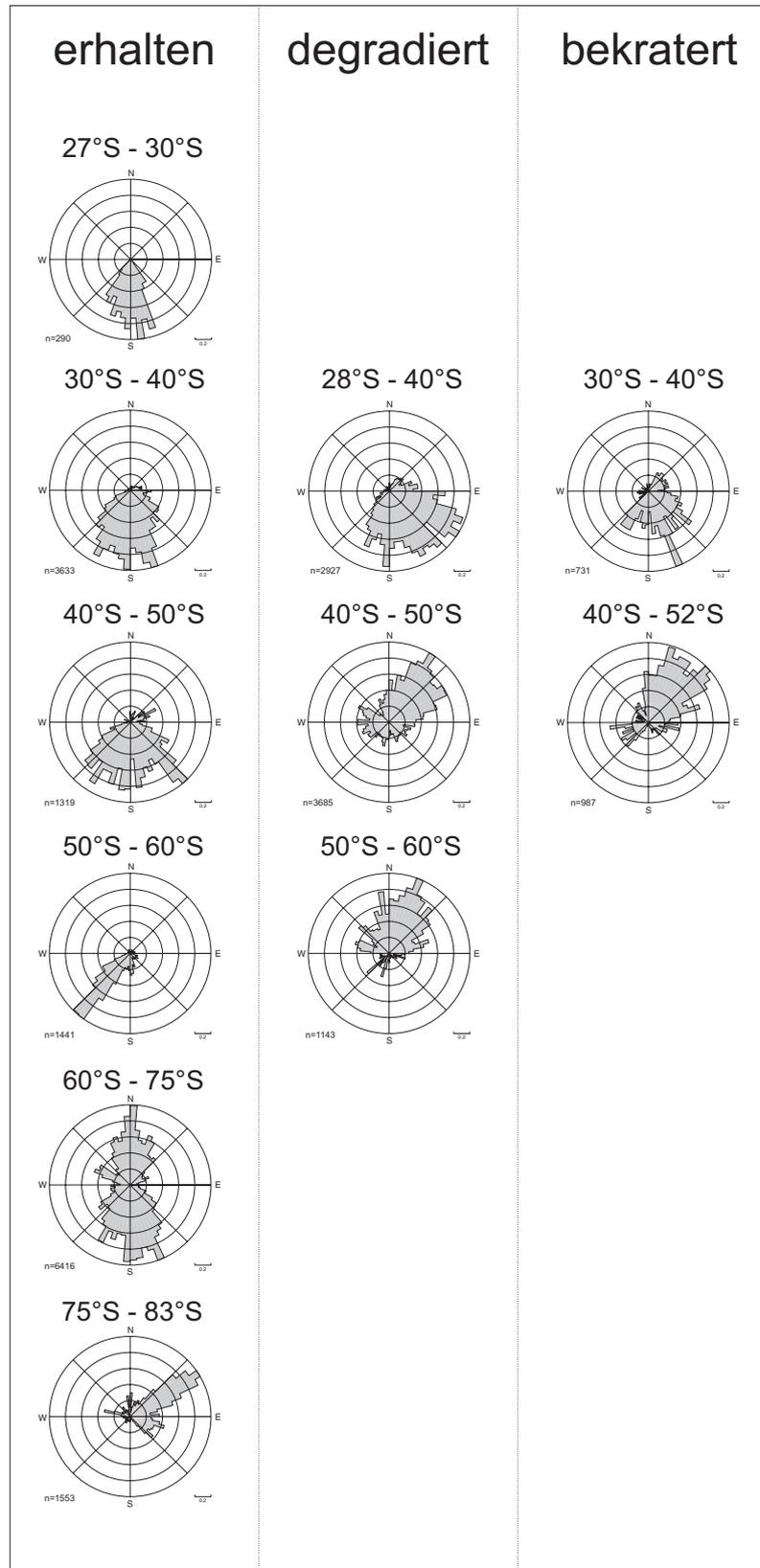


Abb. 73: Azimute der klassifizierten Erosionsrinnen (erhalten, degradiert und bekratert) nach Breitengrad auf der Südhalbkugel.

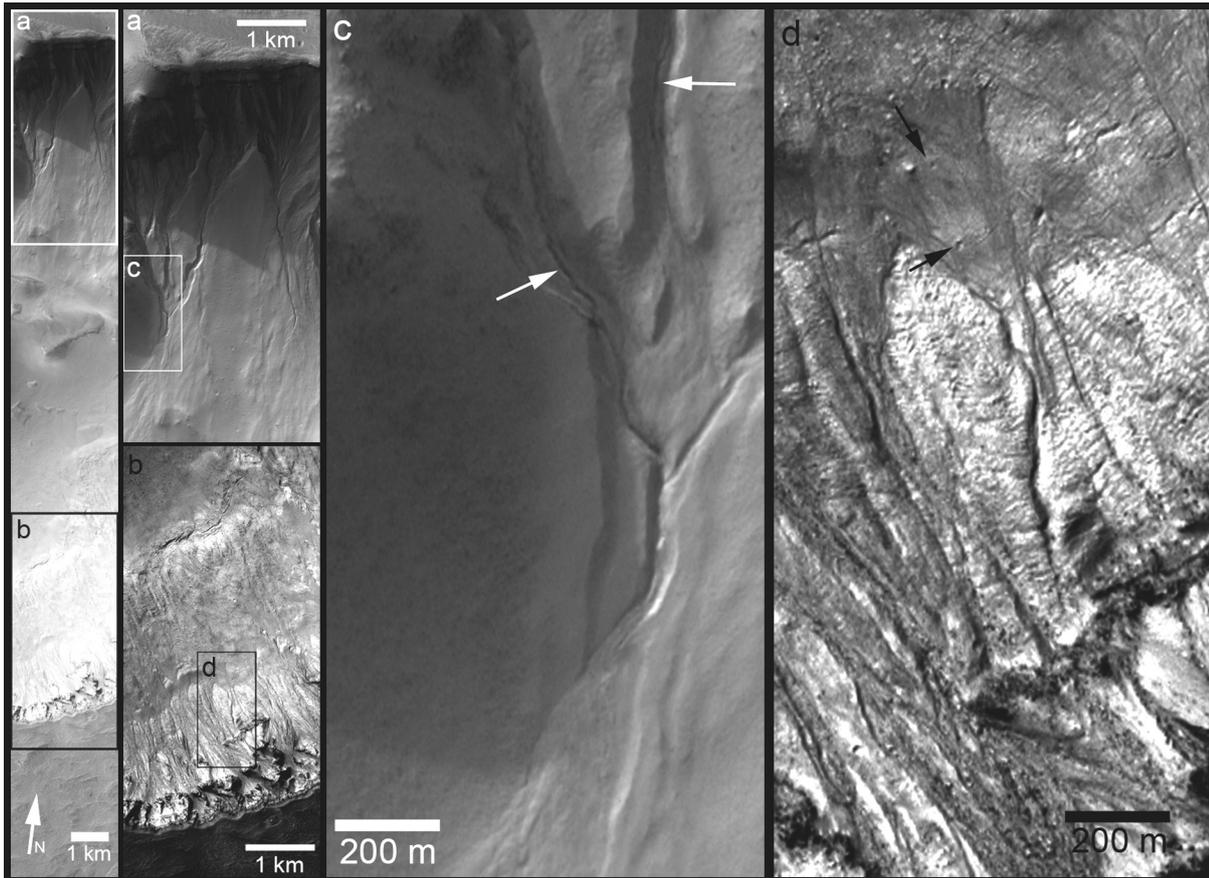


Abb. 74: Erhaltene und bekraterte Erosionsrinnen an unterschiedlichen Hangexpositionen in einer Lokalität: (Links) Ein Ausschnitt des MOC-Streifen (E0301360 bei etwa 354,7°W und 47,9°S) deckt den Süd- und Nordhang einer Depression ab. Die Umrandungen zeigen die vergrößerten Ausschnitte a und b. (a) Vergrößerung vom Ausschnitt des Südhangs; (b) Vergrößerung vom Ausschnitt des Nordhangs. Weitere Vergrößerungen aus a und b zeigen die Ausschnitte c und d: (c) Die Erosionsrinnen an dem südgerichteten Hang zeigen keine Spuren von Degradation oder Kratereinschlägen. (d) Die Vergrößerung des nordgerichteten Hanges zeigt Kratereinschläge auf den Schwemmkegeln. Zudem sind deutliche Degradationserscheinungen (Risse, Verfüllung) zu erkennen.

6.5 Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

Die morphologische Altersklassifikation der Erosionsrinnen zeigt deutlich, daß nicht alle Formen ein junges Alter aufweisen. Die Überlagerung von Einschlagskratern auf den sehr kleinen Flächen der bekraterten Erosionsrinnen deutet auf ein relativ hohes Alter hin. Zudem sind sie nur von kleinen Kraterdurchmesser-Populationen betroffen, so daß die Messungen der Krater-einschlagshäufigkeiten auf ein Modell-Alter zwischen etwa 5 bis 10 Millionen Jahre hinweisen. Die degradierten Erosionsrinnen zeigen deutliche Spuren von äolischen Abtragungsprozessen (Deflation), Staubverfüllung und nachfolgend entstandenen Rißstrukturen. Die unterschiedliche Verbreitung und Höhenlage weisen darauf hin, daß sie nicht genauso alt sind wie die bekraterten Erosionsrinnen und wahrscheinlich zeitlich zwischen den bekraterten und erhaltenen Erosionsrinnen entstanden. Es tritt eine Alterssequenz von den ältesten, bekraterten Erosionsrinnen über die degradierten bis zu den jüngsten, erhaltenen Erosionsrinnen auf.

Die Erosionsrinnen zeigen eine Altersabstufung von den jüngeren, erhaltenen Formen über die degradierten Formen zu den älteren, bekraterten Formen. Unterschiede zwischen diesen drei Formen treten bei der Verbreitung, Exposition sowie der Höhenlage auf. Diese weisen vermutlich auf veränderte Klimabedingungen zur Bildungszeit der Erosionsrinnen hin. Die breitengradabhängigen Vorkommen der drei Klassen zeigt, daß die älteren, bekraterten Formen in beiden Hemisphären nur von etwa 30°S bis 50°S vorkommen, die degradierten hingegen von etwa 30°S bis 60°S und somit auch in höheren Breiten, in denen günstige Klimabedingungen aufgrund höherer verfügbarer Wassermengen vermutlich länger andauerten. Die erhaltenen und damit jüngsten Erosionsrinnen sind in allen Breitengradbereichen, in denen die Erosionsrinnen vorkommen, verbreitet. Neben dem unterschiedlichen, breitengradabhängigen Vorkommen, zeigen die drei „Altersklassen“ eine stark unterschiedliche, auch breitengradabhängige Expositionsrichtung in der südlichen Hemisphäre. In der nördlichen Hemisphäre ist die Exposition aller drei Klassen an SSO-Hänge gebunden und eine breitengradabhängige Änderung der Exposition nicht erkennbar. Dies könnte mit einem relativ stabilen Klima während der gesamten Bildungszeit der Erosionsrinnen in der nördlichen Hemisphäre zusammenhängen, das eine Bildung an den bevorzugten Südost-Hängen und in geringerem Maße an Nordwest-Hängen auslöste. Unterschiede treten aber hinsichtlich der Breitengradverteilung der Erhaltungszustände der Erosionsrinnen auf, die auf eine Veränderung des Klimas hinweisen. Demnach zog sich die Deposition von Wassereis von mittleren Breiten zu höheren Breiten zurück. Die Vorkommen der erhaltenen Erosionsrinnen sind in mittleren Breiten zwischen 27°S und 50°S der südlichen Hemisphäre an Süd-exponierte Hänge gebunden und zwar umso stärker je näher die Erosionsrinnen zum Äquator liegen. Dies deutet darauf hin, daß die Deposition von Wassereis aus der Atmosphäre nur an diesen vor direkter Insolation geschützten Hängen stattfand und/oder das Oberflächeneis bei fortschreitender Jahreszeit und ansteigenden Temperaturen sich dort noch halten konnte bis die Temperaturen soweit angestiegen waren, daß das Wassereis schmelzen konnte. Eine andere Möglichkeit wäre, daß an den polzugewandten Hängen oberflächennahes Grundeis nur bei hohen Neigungen der Marsachse schmelzen kann, da diese dann eine höhere Insolation erhalten (*Costard et al.*, 2002). Das Bodeneis wäre dann aufgrund der Klimaschwankungen zuvor abgelagert worden. Dagegen spricht, daß an den den äquatorzugewandten Hängen keine Hinweise auf jüngere Formen, die auf Eisablagerungen hindeuten würden, zu finden sind. Die Abhängigkeit der Exposition vom Breitengrad weist daher eher auf ein Zusammenspiel zwischen Deposition von Wasser aus der Atmosphäre, Stabilität bei fortschreitender Jahreszeit und Erreichen der Schmelztemperatur des oberflächennahen Eises hin. Die erhaltenen Erosionsrinnen in höheren Breiten zwischen 60°S und 75°S, kommen sowohl an Süd- als auch an Nord-exponierten Hängen vor. Da Wassereis in den polaren Regionen unter heutigen wie auch unter früheren Klimabedingungen ganzjährig oberflächennah stabil ist, wirkt sich dort die Ablagerung aus der Atmosphäre, abhängig von der Exposition, wahrscheinlich nicht mehr so stark aus, sondern

das Erreichen von Schmelztemperaturen durch Insolation tritt in den Vordergrund. Die degradierten und bekraterten Erosionsrinnen kommen wie die jüngeren erhaltenen Erosionsrinnen in dem Breitengradbereich zwischen 28°S und 40°S an Süd-exponierten Hängen vor. Zu ihrer Bildungszeit müssen in diesen äquatornahen Regionen ähnliche Klimabedingungen geherrscht haben wie bei den jüngeren Erosionsrinnen. Die degradierten und bekraterten Erosionsrinnen zwischen 40°S bis 60°S bzw. 40°S bis 50°S weisen eine gänzlich andere Exposition in nordöstliche Richtung auf wie die erhaltenen polaren Erosionsrinnen zwischen 75°S bis 83°S. Dies könnte darauf hindeuten, daß die älteren Formen unter Klimabedingungen entstanden, die den heutigen polaren Klimaten ähnlich sind. Dies würde bedeuten, daß in dem Breitengradbereich zwischen 40°S und 60°S Oberflächeneis einst in größeren Mengen abgelagert wurde.

Da keine bekraterten Erosionsrinnen in Breitengradbereichen zwischen 50°S und 60°S vorkommen, kann davon ausgegangen werden, daß die degradierten Erosionsrinnen zeitlich zwischen den erhaltenen und bekraterten Erosionsrinnen entstanden. Auch die unterschiedlichen Höhenlagen in der südlichen Hemisphäre zwischen den Klassen deuten darauf hin. Diese zeigen, daß die meisten erhaltenen Erosionsrinnen auf einer Höhe liegen, in der unter heutigen klimatischen Bedingungen die 6,1 mbar Grenze saisonal überschritten wird und bei den erhaltenen, polaren Erosionsrinnen im Grenzbereich liegt. Die degradierten Formen liegen in den mittleren Breiten hingegen durchschnittlich etwa 400 m höher und die bekraterten etwa 900 m höher und benötigen, um die Minimalbedingungen von flüssigem Wasser zu erreichen, durchschnittlich etwa 2 - 3 mbar höhere maximale Oberflächendrücke, um zumindest saisonal die 6,1 mbar Grenze zu überschreiten.

6.6 Schlußfolgerungen

1. Der unterschiedliche Erhaltungszusand der Erosionsrinnen (erhaltene, degradierte und bekraterte Formen) deutet auf unterschiedliche Bildungszeiten hin. Die drei Klassen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Verbreitung, Exposition und mittleren Höhenlage. Der Erhaltungszustand zeigt eine Alterssequenz von den ältesten, bekraterten Erosionsrinnen über die degradierten bis zu den jüngsten, erhaltenen Erosionsrinnen.

2. Die Breitengradabhängige Verbreitung der Klassen in beiden Hemisphären zeigt ein zunehmendes Alter der Erosionsrinnen zum Äquator hin. Die jüngsten Erosionsrinnen kommen sowohl in hohen Breiten als auch in mittleren Breiten vor, wohingegen die älteren Erosionsrinnen sich auf mittlere Breitengrade beschränken. Dies deutet auf Wassereisvorkommen und Stabilität von flüssigem Wasser zur Bildungszeit der Erosionsrinnen in mittleren Breiten hin.

3. Die Exposition der Erosionsrinnen auf der Südhalbkugel weist darauf hin, daß die erhaltenen (jüngsten) Erosionsrinnen sich in mittleren Breiten nur an den kälteren, polzugewandten Hängen bilden konnten, während die älteren degradierten und bekraterten Erosionsrinnen nur in mittleren Breiten an den wärmeren, äquatorzugewandten Hängen zu beobachten sind. Möglicherweise traten die älteren Erosionsrinnen auch an den kälteren Hängen auf, wurden aber durch die jüngeren, erhaltenen Erosionsrinnen, überprägt. Zur Bildungszeit der degradierten und bekraterten Erosionsrinnen waren wahrscheinlich größere Mengen von Wassereis in mittleren Breiten, unabhängig von der Exposition, stabil. Die Exposition der jüngeren Erosionsrinnen deutet hingegen darauf hin, daß größere Wassereismengen in der jüngsten Bildungsphase nur noch an den kälteren Hängen vorkamen. In höheren Breiten ist keine bevorzugte Expositionslage der Erosionsrinnen zu erkennen, welches konsistent ist mit den heutigen klimatischen Bedingungen, unter denen Oberflächeneis in Polnähe stabil ist.

4. Die absolute Höhenlage der Erosionsrinnen in mittleren Breiten auf der Südhalbkugel nimmt von den älteren zu den jüngeren Erosionsrinnen hin ab. Dies weist auf abnehmende Oberflächendrücke im Verlauf der unterschiedlichen Bildungszeiten der Erosionsrinnen hin.

5. Insgesamt deuten alle untersuchten Parameter auf einen Klimawandel hin, der sich un-

gefähr in den letzten 10 Millionen Jahren ereignet haben muß. Die Ergebnisse weisen darauf hin, daß Wassereis in der früheren Vergangenheit bis in mittlere Breiten vorkam und sich im Laufe der Zeit zu den Polen zurückzog. Teilweise konnten sich wahrscheinlich in der letzten Bildungsphase der Erosionsrinnen Wassereisvorkommen an den geschützten Hängen in mittleren Breiten niederschlagen. Die Abnahme der Oberflächendrücke im Verlauf der Bildungszeiten der Erosionsrinnen wäre ebenso konsistent mit einem Rückzug der Eisbedeckung von den mittleren zu hohen Breiten, da ganzjährig stabile Eiskappen die Gesamtmasse an Kohlendioxid sowie Wasserdampf in der Atmosphäre verringern würden.

6. Ursache für den Klimawandel könnte eine Änderung der Achsenlage gewesen sein. Die Ergebnisse wären konsistent mit einer Wanderung der Bildung von Erosionsrinnen zu mittleren Breiten bei zunehmender Achsenneigung und zu höheren Breiten bei abnehmender Achsenneigung.

