

5 Erosionsrinnen auf dem Mars

5.1 Allgemeine Merkmale

Erosionsrinnen auf dem Mars wurden erstmals auf den hochauflösenden Bildern der MOC-Kamera der Mars Global Surveyor Mission identifiziert (Malin und Edgett, 2000a). Die vorherigen Bilddaten der Mariner 9 und der beiden Viking-Missionen hatten eine zu geringe Bildauflösung, um diese kleinskaligen Erosionsformen abbilden zu können.

Die Erosionsrinnen auf dem Mars zeigen drei charakteristische, morphologische Merkmale (Abbildung 50): 1) Alkoven (Entstehungsgebiet), 2) Rinnen (Transportzone) und 3) Schwemmkegel (Depositionszone). Die Morphologie zeigt deutliche Analogien zu Erosionsrinnen auf der Erde. Meistens kommen die Erosionsrinnen gehäuft vor, ein Phänomen, welches auch von der Erde bekannt ist und wahrscheinlich die lokalen günstigen Bildungsbedingungen widerspiegelt.

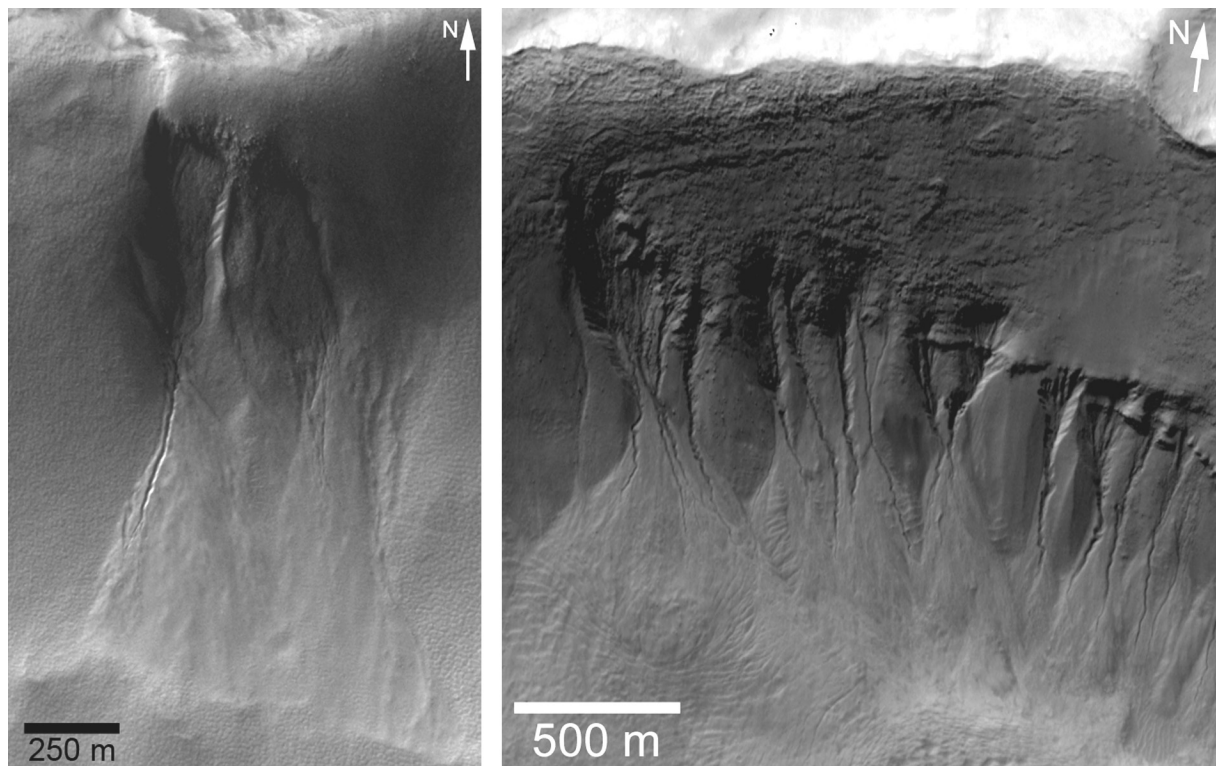


Abb. 50: Typische Morphologie von Erosionsrinnen auf dem Mars: (A) Deutlich zu erkennen sind die typischen Merkmale von Erosionsrinnen auf der Erde bestehend aus der Entstehungszone (Alkove), Transportzone (Rinne) und Ablagerungszone (Schwemmkegel) (M0300537 bei etwa $342,8^{\circ}\text{W}$ und $54,9^{\circ}\text{S}$); (B) Auch auf dem Mars treten die Erosionsrinnen meistens in einer ganzen Serie auf (M1700423 bei etwa $200,9^{\circ}\text{W}$ und $39,2^{\circ}\text{S}$).

Die Erosionsrinnen haben eine Länge von wenigen hundert Metern bis zu mehreren Kilometern und eine Breite von wenigen Metern bis zu etwa 20 Metern. Vermutlich gibt es auch Erosionsrinnen von geringeren Ausmaßen, die durch den begrenzenden Faktor der Bildauflösungen ($> 1,4 \text{ m/pix}$) nicht mehr abgebildet werden.

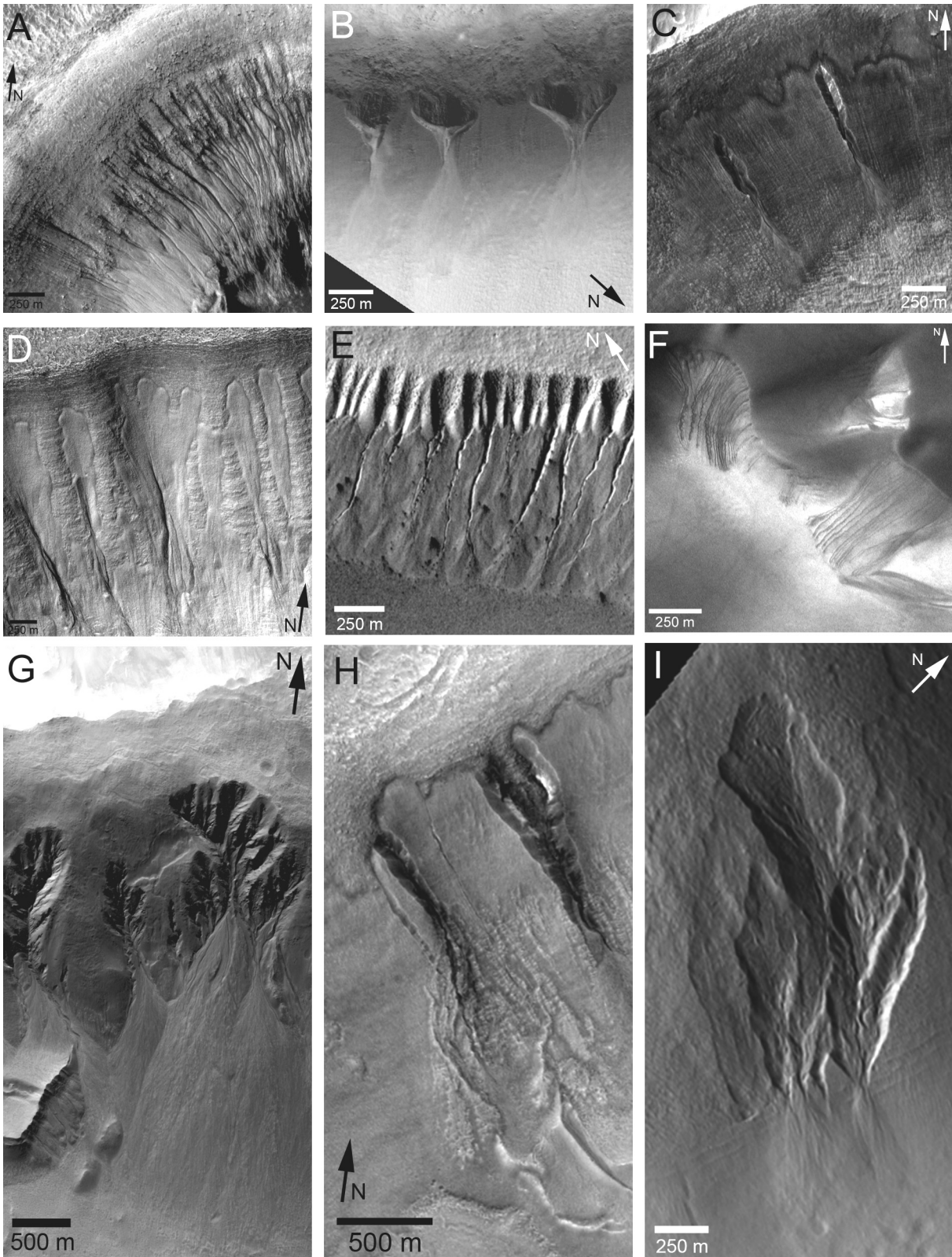


Abb. 51: Unterschiedliche Morphologien von Erosionsrinnen auf dem Mars: (A) Längliche Alkoven, die direkt in Rinnen übergehen (M1100944 bei etwa 160,1°W und 41,2°S); (B) Sehr breite Alkoven (M0302214 bei etwa 336,3°W und 58,8°S); (C) Tief eingeschnittene, längliche Alkoven mit Rinnen (E1201712 bei etwa 144,1°W und 38,1°S); (D) Bedeckte Alkoven (M1101601 bei etwa 267°W und 33,1°S); (E) Typische Morphologie von polaren Erosionsrinnen. Stark erodierter Oberhang, der von den Alkoven triangular zerschnitten ist (M0302709 bei etwa 356,1°W und 70,8°S); (F) Erosionsrinnen an Hängen von dunklen Dünen (M0704545 bei etwa 340,8°W und 47,4°S); (G) Stark erodierte Entstehungszonen und große Ablagerungsbereiche (M1700207 bei etwa 164,4°W und 39,2°S); (H) Eine dem anstehenden Gestein aufliegende Schicht wurde am Oberhang erodiert. Die Alkoven beginnen direkt an der Grenze zwischen bereits abgetragenen und noch anstehendem Mantelmaterial (E1001144 bei etwa 126,8°W und 42,7°S); (I) Großflächige, flache Entstehungsgebiete und kleinvolumige Ablagerungsbereiche (M0306887 bei etwa 71,5°W und 52,1°N).

Die charakteristischen Merkmale treten zwar bei allen Erosionsrinnen auf, können aber hinsichtlich ihrer Ausmaße und Form erheblichen Schwankungen unterliegen (Abbildung 51). Besonders deutlich ist dies bei der Form der Alkoven ersichtlich, die länglich, breit oder triangular geformt sein können und unterschiedlich stark in den Hang hineinerosiert sind bzw. auch bedeckt sein können. Die Übergänge zwischen den einzelnen, unterschiedlichen Formen sind fließend.

Eine spezielle Morphologie, die nur in polaren Breiten auftritt, wurde in die Auswertung der Erosionsrinnen in der vorliegenden Arbeit miteinbezogen, obwohl die Morphologie der Formen nicht immer alle drei beschriebenen Merkmale vollständig erfüllt (Abbildung 52). Morphologisch unterscheidet sie sich von den Erosionsrinnen durch die deutliche Ausprägung einer Rinne. Die für die polaren Erosionsrinnen typischen Alkoven sind jedoch vorhanden und gehen direkt in die Ablagerungszone über, die aus sich überlagernden Schwemmkegeln besteht und bereits am Oberhang beginnt. Häufig sind auch vereinzelt Rinnen zu erkennen (Abbildung 52A), was die Vermutung nahe legt, daß der gleiche Prozeß zur Bildung beider Formen führte. Die Erosionskraft scheint bei den polaren Spezialformen nicht ausreichend gewesen zu sein, um Rinnen zu bilden. Sie kommen ausschließlich in polaren Breiten zwischen $> 73^{\circ}\text{S}$ und $< 83^{\circ}\text{S}$ vor.

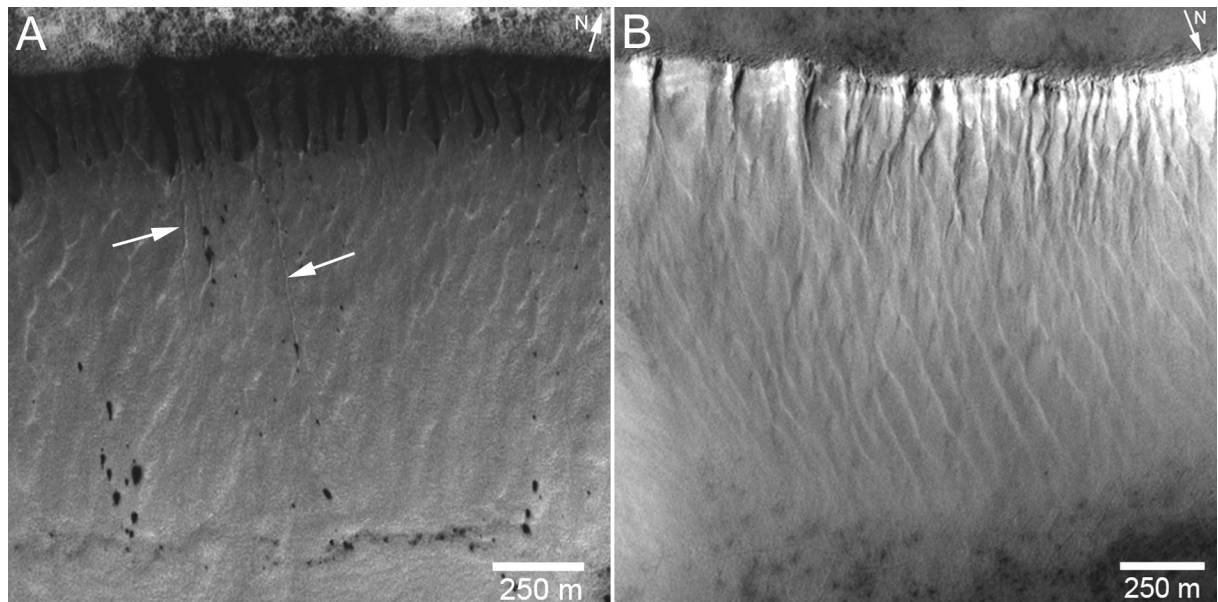


Abb. 52: Morphologie von Formen spezieller polarer Massenbewegungen: (A) Sich überlagernde Ablagerungsgebiete. Die weißen Pfeile zeigen vereinzelt Rinnen (E0900576 bei etwa 3°W und 73°S); (B) Deutlich zu erkennen sind die Entstehungsgebiete an der Hangkante. Rinnen sind im oberen Drittel des Hanges noch zu beobachten. Die sich überlappenden Ablagerungen beginnen jedoch frühzeitig (E1300367 bei etwa 9,1°W und 73,6°S).

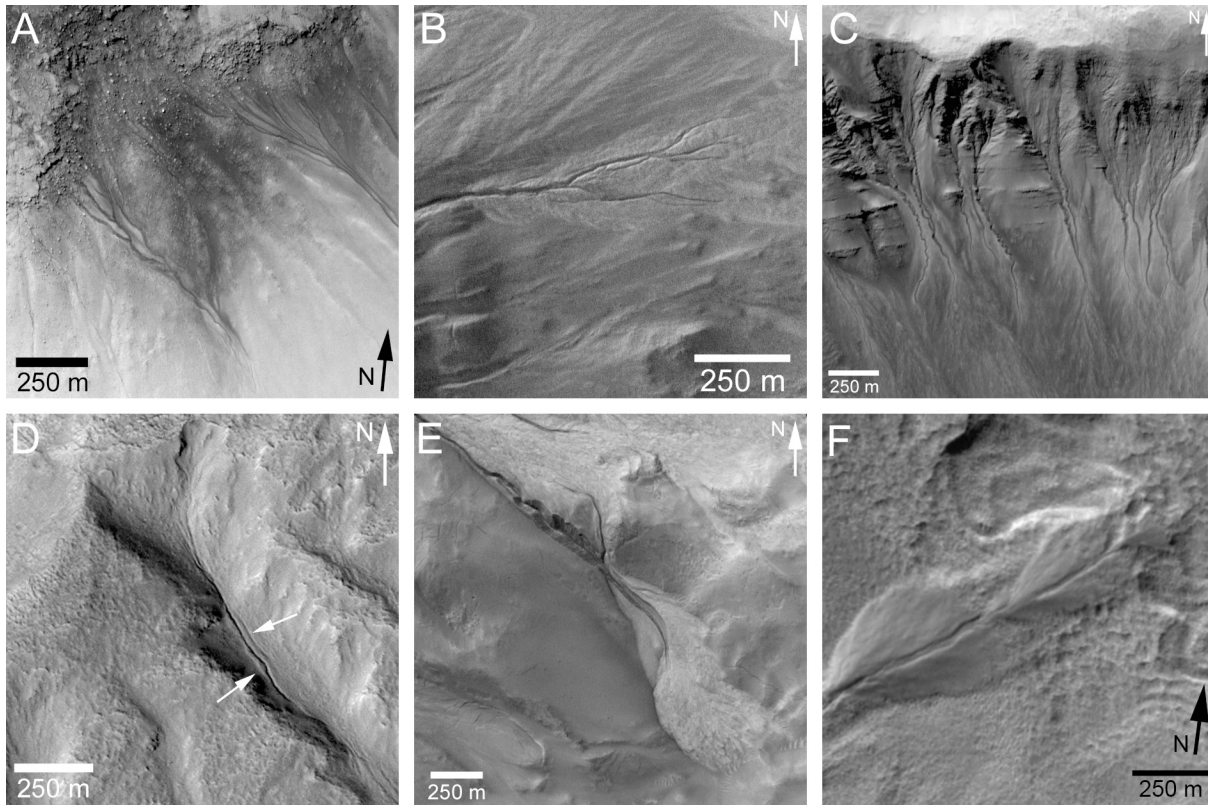


Abb. 53: Details der Morphologie von Erosionsrinnen: (A) Einzelne Erosionsrinnen verzweigen sich zu einer Einzelrinne am Oberhang (M1200595 bei etwa 355°W und 48°S); (B) Verzweigungen von Rinnen auf dem Schwemmkegel (R0201464 bei etwa $355,8^{\circ}\text{W}$ und $47,9^{\circ}\text{S}$); (C) Starke Sinuosität von Rinnen (E1600043 bei etwa $158,2^{\circ}\text{W}$ und $41,8^{\circ}\text{S}$); (D) Seitliche Ablagerungen (levées) an den Rinnen (E0201697 bei etwa $240,3^{\circ}\text{W}$ und 41°N); (E) Starkes Einschneiden (gullying) von Rinnen und Schwemmkegel mit eingeschnittener Rinne (M1501466 bei etwa $168,4^{\circ}\text{W}$ und $37,6^{\circ}\text{S}$); (F) Drei Schwemmkegel, die von nachfolgenden Ereignissen überformt wurden und auf mehrfache Fließprozesse schließen lassen (E0201137 bei etwa $326,7^{\circ}\text{W}$ und $51,3^{\circ}\text{S}$).

Trockene Massenbewegungen sind auf dem Mars ebenfalls zu beobachten (Abbildung 54) und kommen regional auch neben den beschriebenen Erosionsrinnen vor. Sie weisen jedoch eine andere Morphologie auf und die charakteristischen in den Hang eingeschnittenen Rinnen fehlen völlig. Einige Autoren wie *Treiman* (2003) klassifizieren sie jedoch ebenso als Erosionsrinnen, obwohl oben beschriebene Klassifikationskriterien wie Verzweigung, Sinuosität und laterale Ablagerungen von Rinnen nicht zu beobachten ist. Die Formen trockener Massenbewegungen sind neben Vorkommen in mittleren und hohen Breiten auch häufig in äquatorialen Gebieten anzutreffen (vgl. Abbildung 54). Morphologisch betrachtet beginnen sie wie die Erosionsrinnen in alkovenartig eingeschnittenen Depressionen am Oberhang, zeigen eine linienhafte Spur den Hang hinunter und enden zumeist ohne erkennbares Ablagerungsgebiet (Abbildung 54A-C). Die linienhaften Spuren sind dabei höchstens sehr flach in den Hang eingeschnitten, was auf eine geringe Erosionsleistung des Prozesses schließen läßt. In Regionen, in denen große Mengen von verwittertem Schuttmaterial aus anstehendem Hangmaterial geliefert wird, kommt es zur Bildung von Schutthalden (Talus) (Abbildung 54D).

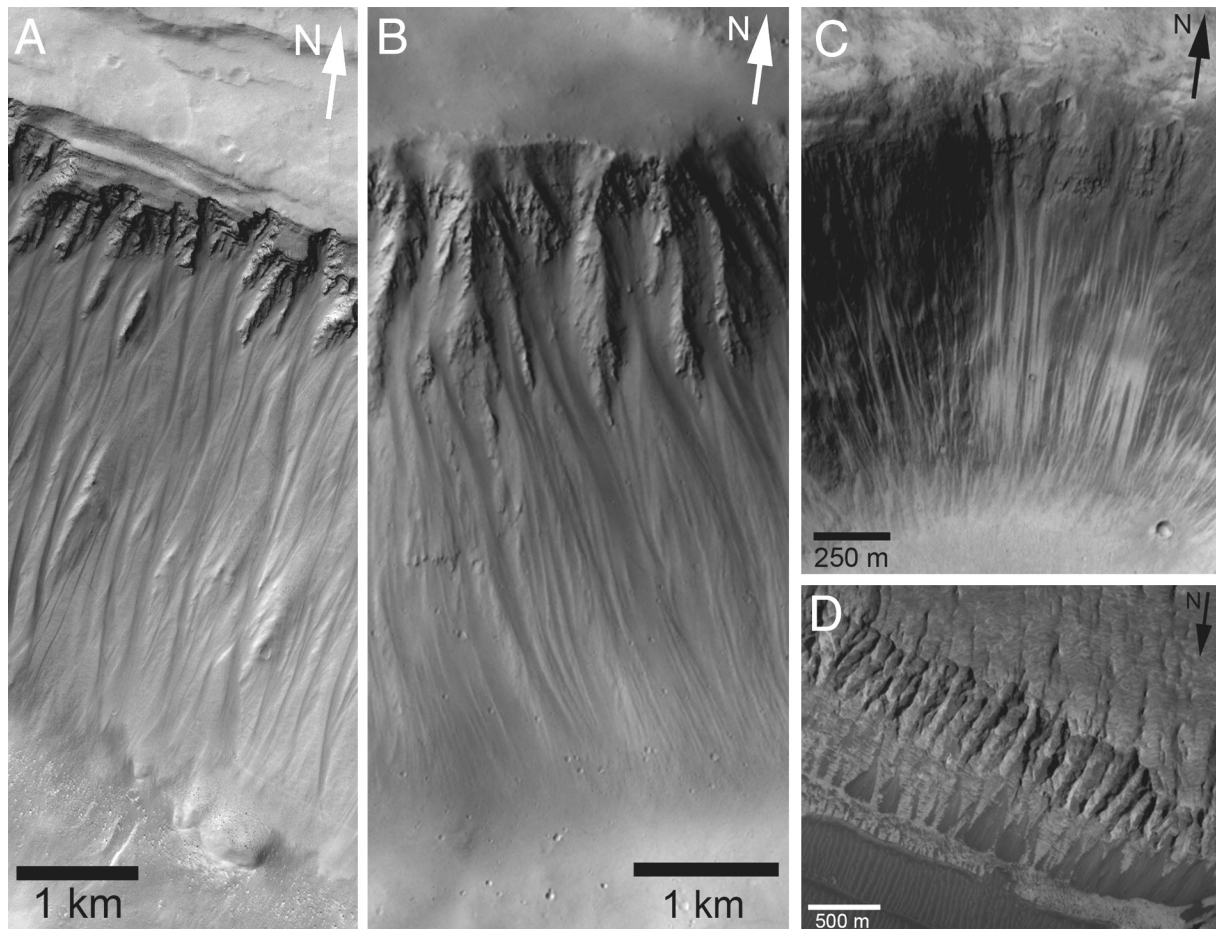


Abb. 54: Morphologie von Formen trockener Massenbewegungen: (A) (M1801192 bei etwa 113°W und $0,8^{\circ}\text{N}$); (B) (E0301974 bei etwa $91,1^{\circ}\text{W}$ und $13,6^{\circ}\text{N}$); (C) (M0302294 bei etwa $43,3^{\circ}\text{W}$ und 3°N); (D) (M0301869 bei etwa $74,6^{\circ}\text{W}$ und $10,4^{\circ}\text{S}$).

Interessant ist die mögliche Vergesellschaftung von Erosionsrinnen mit glazialen-periglazialen Formen auf dem Mars, die häufig in den Bilddaten zu beobachten ist. Zum einen kommen die Erosionsrinnen teilweise, wie oben beschrieben, an Hängen vor, die vorhergehend durch mögliche Kriechprozesse (Gelifluktion) modifiziert wurden (Abbildung 51C, F und H). Zum anderen sind in den Breitengradregionen, in denen Erosionsrinnen vorkommen, wenn auch selten, glaziale/periglaziale, blockgletscher-ähnliche Formen zu finden (Abbildung 55A). Diese Formen zeigen laterale und an ihrem Ende sichelförmige, endmoränenartige Ablagerungen. Diese sichelförmigen Ablagerungen sind sehr häufig am Hangfuß in Gebieten anzutreffen, in denen auch Erosionsrinnen vorkommen (Abbildung 55B).

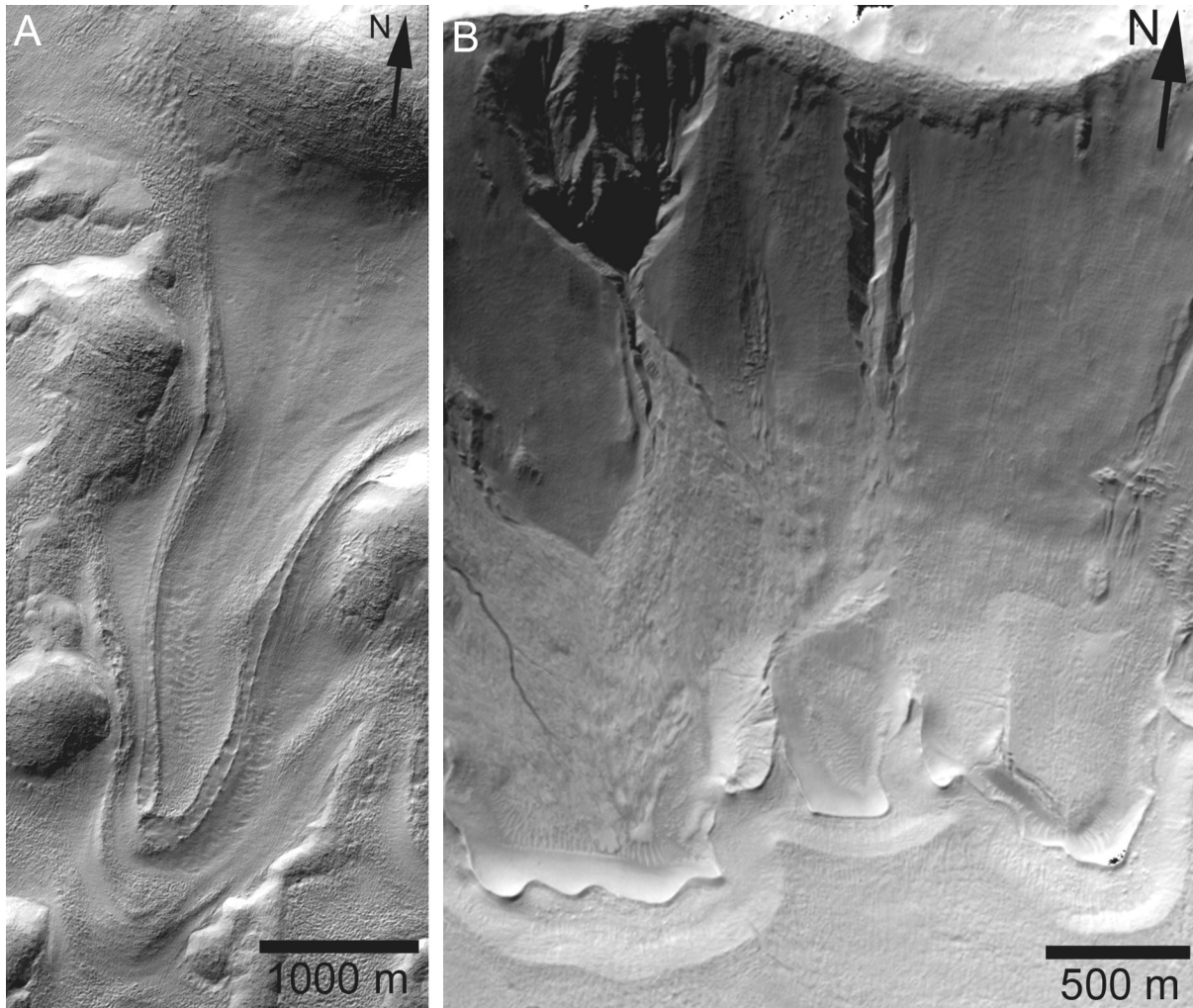


Abb. 55: Vergesellschaftung von glazialen Formen und Erosionsrinnen: (A) Mögliche glaziale Form, die durch Kriech- oder Fließprozesse ähnlich zu Blockgletschern auf der Erde gebildet worden sein könnte. Auffällig sind die seitlichen wie auch die endmoränenartigen Ablagerungen (M1800987 bei etwa 247,1°W und 38,6°S); (B) Ähnliche endmoränenartige Ablagerungen sind häufig am Hangfuß von Gebieten zu beobachten, in denen auch Erosionsrinnen vorkommen. Die Überlagerung der Erosionsrinnen über die möglichen glazialen Formen zeigt deutlich das jüngere, relative Alter der Erosionsrinnen (M1800303 bei etwa 166,3°W und 39°S).

Heutige aktive saisonale Prozesse auf dem Mars in den Erosionsrinnengebieten ist (neben den äolischen Prozessen von Staubteufeln und -stürmen) die Deposition von Frost in polnahen Gebieten (Abbildung 56). Während der Wintermonate lagert sich in diesen Gebieten (s. auch Kapitel 2.5) Wasser- und Kohlendioxideis aus der Atmosphäre ab. Die Massenanteile von Wasser- und Kohlendioxideis sind nicht bekannt, aber die Kohlendioxideisanteile dürften aufgrund der höheren Atmosphärenanteile die des Wassereises bei weitem übertreffen. Bei fortschreitender Jahreszeit sublimiert die Eisbedeckung zuerst an den sonnenzugewandten Hängen und Ebenen, während sich die Eisbedeckung an den kälteren, sonnenabgewandten (geschützten) Hängen je nach Breitengradlage bis in das Frühjahr/Sommer in der jeweiligen Hemisphäre halten kann.

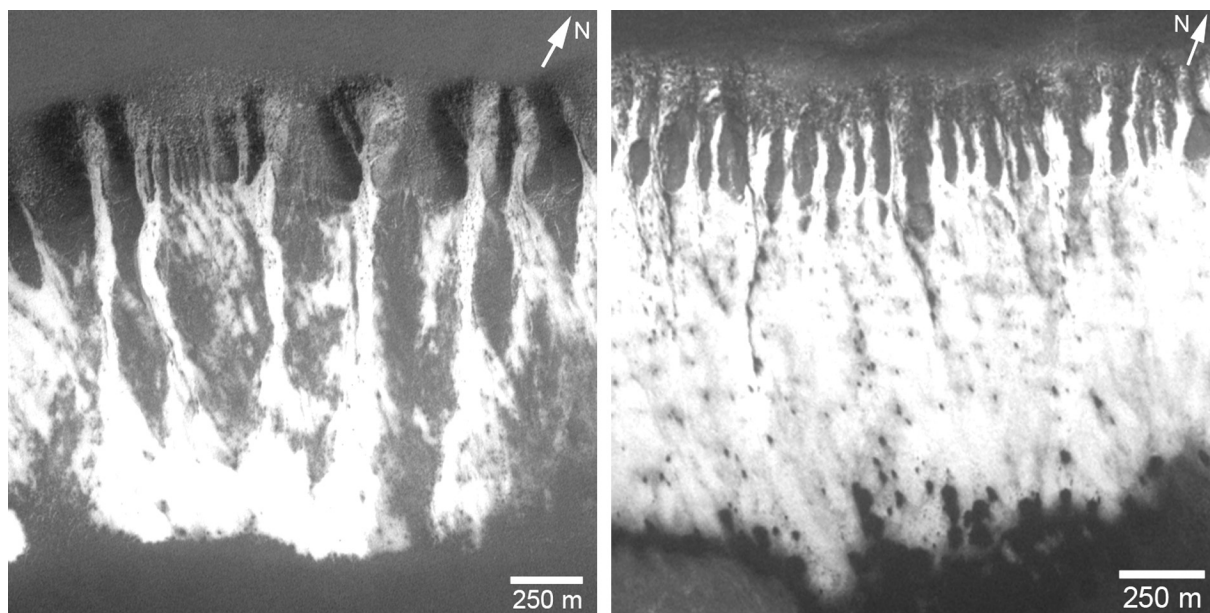


Abb. 56: Frostbedeckung von Erosionsrinnen im Frühjahr: (A) E0900928 bei etwa $356,6^{\circ}\text{W}$ und $71,1^{\circ}\text{S}$ bei $L_S=251,3^{\circ}$; (B) M1001115 bei etwa $2,7^{\circ}\text{W}$ und $72,6^{\circ}\text{S}$ bei $L_S=260,4^{\circ}$.

5.2 Theorien zum Formationsprozess

Da die Morphologie der Erosionsrinnen sehr stark denen auf der Erde ähnelt, die durch Schuttströme gebildet werden, gehen die meisten Wissenschaftler davon aus, daß auch auf dem Mars Wasser an den Prozessen beteiligt war (s. Tabelle 10), die die typische Morphologie der Erosionsformen bildeten. Wegen der längerfristigen Instabilität von flüssigem Wasser auf der Oberfläche des Mars unter heutigen Bedingungen, unterscheiden sich die Formationstheorien jedoch beträchtlich. Wegen dieser Tatsache wurden auch andere Bildungsmechanismen, die ohne flüssiges Wasser als Medium auskommen, in Betracht gezogen. Im Folgenden werden deshalb die unterschiedlichen Formationstheorien ausführlicher behandelt.

Medium	Prozess	Alter	abgeleitet aus	Referenz
Wasser	Grundwasserquellaustritte	< 1 Ma - -	Überlagerung von Dünen und Polygonen - -	<i>Malin und Edgett (2000a)</i> <i>Gilmore und Phillips (2002)</i> <i>Heldmann und Mellon (2004)</i>
Wasser	Schmelzen von Grundeis durch geothermale Erwärmung	Rezent < 10 Ma - -	rez. Grundwasser Datierung junger Lavaströme - -	<i>Gaidos (2001)</i> <i>Hartmann (2001)</i> <i>Mellon und Phillips (2001)</i> <i>Heldmann und Mellon (2004)</i>
Wasser	Schmelzen von Oberflächeneis durch höhere Achsenneigung	< 6 Ma ~10 ⁵ Jahre ~10 ⁵ -10 ⁶ Jahre	Modell Verweis auf Modell Verweis auf Modell	<i>Costard et al. (2002)</i> <i>Lee et al. (2001)</i> <i>Christensen (2003)</i>
Staub, Sand	Trockene Massenbewegungen	Rezent Rezent	rez. Klima Laborversuch	<i>Treiman (2003)</i> <i>Shinbrot et al. (2004)</i>
CO ₂ , flüssig	Tiefenausstritte	Rezent	rez. CO ₂ -Aquifere rez. CO ₂ -Aquifere	<i>Hoffman (2000)</i> <i>Musselwhite et al. (2001)</i>
CO ₂ , gasförmig	Sublimation	Rezent	rez. Klima	<i>Hoffman (2000, 2002)</i>
CO ₂ -Hydrate	Zerfall > Wasser	Rezent	rez. Klima	<i>Jöns (2002)</i>

Tab. 10: Theorien zur Bildung von Erosionsrinnen auf dem Mars. Mit dem Prozeß ist in allen Fällen Erosion verbunden, der durch die beschriebenen Vorgänge ausgelöst wird.

5.2.1 Wasser

Malin und Edgett (2000a) gehen davon aus, daß die Erosionsrinnen durch Quellaustritte von flachgründigen Aquiferen und nachfolgendem Oberflächenabfluß gebildet wurden. Nach einem einfachen Modell bleibt das Wasser unter dem Druck der Gesteinsschichten flüssig und staut beim Fließen in Richtung des Hanges aufgrund der kalten Oberfläche einen Eisdamm auf, der ein vorzeitiges Aussickern verbunden mit schneller Verdunstung des Wassers verhindert. Der Druck von nachfließendem Wasser könnte dann zu einem kurzfristigen Ausbruch von Wasser führen, das vermischt mit Gesteinsmaterial (Schuttstrom) die Rinnen formt. Dies würde das Auftreten der Erosionsrinnen an den kälteren, polwärts gerichteten Hängen erklären. Das fehlende Auftreten an den wärmeren, zum Äquator gerichteten Hängen und in äquatorialen Breiten wird mit der hohen Sonneneinstrahlung und damit vorzeitigen Sublimation von Grundwasser erklärt. Als Hauptgrund für diese Theorie führen sie, neben der Lagerichtung und -verteilung und der dauerhaften Instabilität von Wasser an der Marsoberfläche, die mehrere hundert Meter unter der lokalen Oberfläche gelegenen Alkoven der Erosionsrinnen an, die regional auch über mehrere Kilometer auf demselben Niveau und in den gleichen geologischen Formationen zurückzuverfolgen sind.

Diese Theorie wird von *Gilmore und Phillips* (2002) unterstützt, die Detailuntersuchungen in drei verschiedenen Regionen (Nirgal Vallis, Dao Vallis und Hale Krater) durchführten. Dabei stellten sie fest, daß 1) die Erosionsrinnen von kliffbildenden Schichten (Schichtstufe) ausgehen, 2) die Tiefe der Alkoven unter der lokalen Oberfläche zwischen 70 m bis 800 m liegt und 3) die Tiefen mit den geologischen Einheiten korrelieren. Zu dem gleichen Ergebnis kommen sie bei der Untersuchung der Erosionsrinnen auf der Nordhalbkugel, wobei die Tiefe der Alkoven zwischen 0 m bis 500 m unter der lokalen Oberfläche schwankt (*Gilmore und Goldenson*, 2004). Sie schlagen ein Modell vor, in dem ein Schmelzen von oberflächennahem Wassereisfrost durch permeable Schichten perkoliert bis es auf eine stauende, geneigte Schicht trifft und entlang dieser zu den Hängen fließt, dort austritt und die Erosionsrinnen formt. Da die Tiefe der Alkoven nicht mit dem Breitengrad korreliert, vermuten sie, daß kein Permafrost als Grundwasser stauende Schicht in Frage kommt, da die Tiefe zum Äquator dann abnehmen müßte.

Schmelzen von Grundeis durch geothermale Erwärmung und nachfolgende Grundwasserquelleaustritte werden von *Gaidos* (2001) und *Hartmann* (2001) vermutet. Der Prozeß ist der gleiche wie bei *Malin und Edgett* (2000a) mit dem Unterschied, daß das Eis im Untergrund durch geothermale Erwärmung den Schmelzpunkt erreicht.

Anhand von terrestrischen Analogien auf Devon Island (Kanada) kommen *Lee et al.* (2001) zu dem Schluß, daß die Erosionsrinnen durch Schmelzen von Oberflächeneis /-schnee gebildet worden sein könnten. Die Alkoven und auch die Rinnen der Erosionsformen auf Devon Island dienten als Nivationsnischen und in-situ Beobachtungen zeigten, daß die akkumulierten Eis- bzw. Schneereste im Sommer oberflächlich abtauten und zu Oberflächenabfluß in den Rinnen führten. Den gleichen Prozeß vermuten sie auf dem Mars für die Bildung der Erosionsrinnen, wobei das Oberflächeneis zu Zeiten einer hohen Neigung der Rotationsachse vor ca. 10^5 Jahren oder weniger abgelagert wurde und es zur Bildung der Erosionsformen kam.

Costard et al. (2002) kommen zu dem gleichen Schluß, daß das Schmelzen von oberflächennahem Wassereis zu Zeiten von höheren Neigungen der Marsachse für die Bildung der Erosionsrinnen verantwortlich ist. Ihre These stützt sich auf terrestrischen Analogien in Ost-Grönland (Jameson Land) (*Peulvast*, 1988) und numerischen Simulationen, die zeigen, daß Schmelztemperaturen von Wassereis durch verstärkte Sonneneinstrahlung bei höherer Achsenneigung des Mars in den Breitengraden und an den Hangexpositionen auftreten, in denen die Erosionsrinnen auf dem Mars beobachtet wurden.

Auch *Christensen* (2003) vermutet für die Bildung von Erosionsrinnen ein Schmelzen von oberflächennahem Wassereis. In Bilddaten hat er Formen entdeckt, die er als Überreste von Schneedecken interpretiert. Wasser wird auch in seinem Modell bei hoher Achsenneigung des Mars, letztmals in einem Zeitraum vor 10^5 - 10^6 Jahren, von den Polen an den kälteren, polzugewandten Hängen in mittleren Breiten aus der Atmosphäre als Schnee abgelagert. Während Zeiten geringerer Achsenneigung können diese Schneebedeckungen aufgrund höherer Temperaturen in mittleren Breiten schmelzen und die Rinnen bilden. Das flüssige Wasser wird dabei von einer isolierenden, dünnen Schicht vor schneller Evaporation geschützt. Ein Schmelzen von Überresten dieser Schneedecken könnte seiner Meinung nach vielleicht auch noch unter heutigen Bedingungen stattfinden, da diese von einer Schicht atmosphärischen Staubes vor Sublimation geschützt sind.

Die Theorien, die Wasser als Agens in Betracht ziehen, gehen beim Schmelzpunkt von reinem Wasser aus. Die Herabsetzung des Schmelzpunktes von Wassereis durch Salze könnte bei den kalten, klimatischen Bedingungen auf dem Mars eine wichtige Rolle spielen. *Knauth und Burt* (2002) und *Burt und Knauth* (2003) vermuten, daß die Gefrierpunktniedrigung von stark salzhaltigen Lösungen (Sole, engl. brine) bei den Prozessen, die zur Bildung der Erosionsrinnen führen, beteiligt sein könnten und eine Schmelzpunktniedrigung von bis zu ~ 50 K (je nach Salzzusammensetzung und Konzentration) nach sich ziehen könnte.

5.2.2 Kohlendioxid und CO₂-Hydrate

Die dauerhafte Instabilität von flüssigem Wasser, die niedrigen Temperaturen und die großen Mengen von Kohlendioxid in der Atmosphäre sowie von gefrorenem Trockeneis an den Polkappen veranlaßte einige Wissenschaftler alternative Medien wie CO₂, die zur Formung der Erosionsrinnen geführt haben könnten, in Betracht zu ziehen (*Hoffman*, 2000; *Musselwhite et al.*, 2001; *Hoffman*, 2002; *Jöns*, 2002).

So weist *Hoffman* (2000) darauf hin, daß die Erosionsrinnen durch unterirdisches, flüssiges CO₂, durch Kohlendioxid-Dichteströme (density flows) oder auch durch CO₂-geschmierte Körnerströme gebildet werden könnten. Detailuntersuchungen von Erosionsrinnen in einer südpolaren Senke (Sisyphi Cavi), die saisonal mit CO₂-Frost bedeckt ist, deuten darauf hin, daß rezente Veränderungen auftreten (*Hoffman*, 2002). Diese werden von *Hoffman* (2002) als CO₂-geschmierte Lawinen gedeutet, die entstehen, wenn durch Erwärmung im Frühjahr an der Basis gasförmiges CO₂ freigesetzt wird und das darüber liegende CO₂-Eis ins Rutschen bringt. Diese Prozesse werden mit der Bildung von ähnlichen Formen auf der Erde, die durch pyroklastische Ströme von vulkanischen Aschen und Gas bei Vulkanausbrüchen gebildet werden, verglichen.

Nach einem anderen Modell formt flüssiges CO₂ die Rinnen (*Musselwhite et al.*, 2001). CO₂-Aquifere, die aufgrund des lithostatischen Druckes in etwa 100 m Tiefe auftreten könnten, bauen hinter einer Wassereisschicht vermischt mit Staubmaterial an den Hängen einen Druck auf, der durch Insolation an den Hängen zur Entlastung führt und explosionsartig austritt. Dabei werden die Rinnen durch eine Mischung aus flüssigem und gasförmigem CO₂ vermischt mit Hangmaterial gebildet.

Eine weitere Formationstheorie basierend auf den Zerfall von CO₂ und H₂O wird von *Jöns* (2002) vermutet. Seiner Ansicht nach könnten die Erosionsrinnen als Resultat der Aktivität instabil gewordener CO₂-Hydrate entstehen (s. Kapitel 2.5.4). Bei diesem Prozeß würden bei ihrem Zerfall auf den kälteren, von der Sonne abgewandten Hängen das sehr rasch verdampfende CO₂-Trockeneis als auch das langsamer verdampfende Wasser freigesetzt. Das kurzfristig flüssig gewordene Wasser wäre durch seinen Abfluß in diesem Modell jedoch hauptsächlich für die eingeschnittenen Erosionsrinnen und den größten Teil des Sedimenttransportes verantwortlich.

5.2.3 Trockenrutschungen

Ein gänzlich anderer Prozeß der Bildung von Erosionsrinnen wird von *Treiman* (2003) vermutet. Seinem Modell nach wurden die Rinnen durch trockene Massenbewegungen von windverfrachtetem Feinmaterial (Staub und Ton) gebildet. Das Vorkommen der Erosionsrinnen ist konsistent mit Regionen, in denen von globalen Atmosphärenzirkulationsmodellen nachlassende Windaktivität und damit eine erhöhte subaerische Sedimentation von Feinmaterial stattfindet. Die Sedimentfracht wird dann bevorzugt an windgeschützten Hängen abgelagert. An diesen steilen Hängen kann es dann zur Bildung von Körnerströmen kommen, die morphologisch ähnliche Formen wie Schneelawinen auf der Erde bilden. Auch *Shinbrot et al.* (2004) geht nach Laborexperimenten mit sehr feinem Staub davon aus, daß die Erosionsrinnen auf dem Mars durch trockene Massenbewegungen entstanden. Die resultierenden Kleinformen entsprechen aber in ihrer Morphologie denjenigen, die durch Trockenrutschungen auch auf dem Mars (vgl. Abbildung 54) entstehen. Sie weisen keinerlei Ähnlichkeiten (z.B. Sinuosität, Verzweigung) mit Erosionsrinnen auf.

5.3 Vorkommen

Malin und Edgett (2000a) veröffentlichten in ihrem ersten Artikel eine globale Untersuchung der Erosionsrinnen, die auf einer Datenbasis von über 20000 MOC-NA Aufnahmen (Subphasen AB-M18) basiert. In etwa 150 Bildern wurden Erosionsrinnen beobachtet. Die Erosionsrinnen treten in beiden Hemisphären in mittleren und hohen Breiten polwärts ab 30° auf (mit der Ausnahme des Trockentals Nirgal Vallis bei 28°). Insgesamt kommen sie auf der Südhalbkugel jedoch mit etwa 90 % aller Erosionsrinnen häufiger vor. Ihre Verbreitung ist desweiteren regional gehäuft. Sie treten im wesentlichen an Innenwänden von Kratern und südpolaren Senken, sowie an Hängen von zwei Talsystemen (Nirgal und Dao Vallis) auf. Die Formen beginnen typischerweise innerhalb von einigen hundert bis fünfhundert Metern unter der lokalen Oberfläche.

5.3.1 Globale Verbreitung

Die vom Autor untersuchten hochauflösenden MOC-Bilddaten (Orbits AB-R02, < 25 m/pxl) umfassen 54862 Einzelbilder, die ca. 3,2% der Marsoberfläche abdecken. In 1485 Bildern konnten Erosionsrinnen identifiziert werden. Die globale Lage der Bilddaten (Abbildung 57), in denen Erosionsrinnen auftreten zeigt, daß der überwiegende Anteil (89,5% Süd und 10,5% Nord) in der südlichen Hemisphäre vorkommt. Auffällig sind die Hauptverbreitungsgebiete der Erosionsrinnen zwischen $30^\circ - 60^\circ$ Breite in beiden Hemisphären. In höheren Breiten kommen auf der Südhalbkugel nur zwei größere Cluster vor (Sisyphi Cavi und Cavi Angusti) und auf der Nordhalbkugel nur wenige verteilte Einzeltvorkommen. In den mittleren Breiten $< 30^\circ$ gibt es nur auf der Südhalbkugel einzelne, regionale Vorkommen, die sich fast ausschließlich auf Vorkommen im Nirgal Vallis beschränken. Diese reichen in mittleren Breiten aber nicht über $< 27^\circ$ S hinaus. Auffällig sind zudem die sehr geringen Vorkommen in einem Breitengradbereich zwischen 60° S und 70° S.

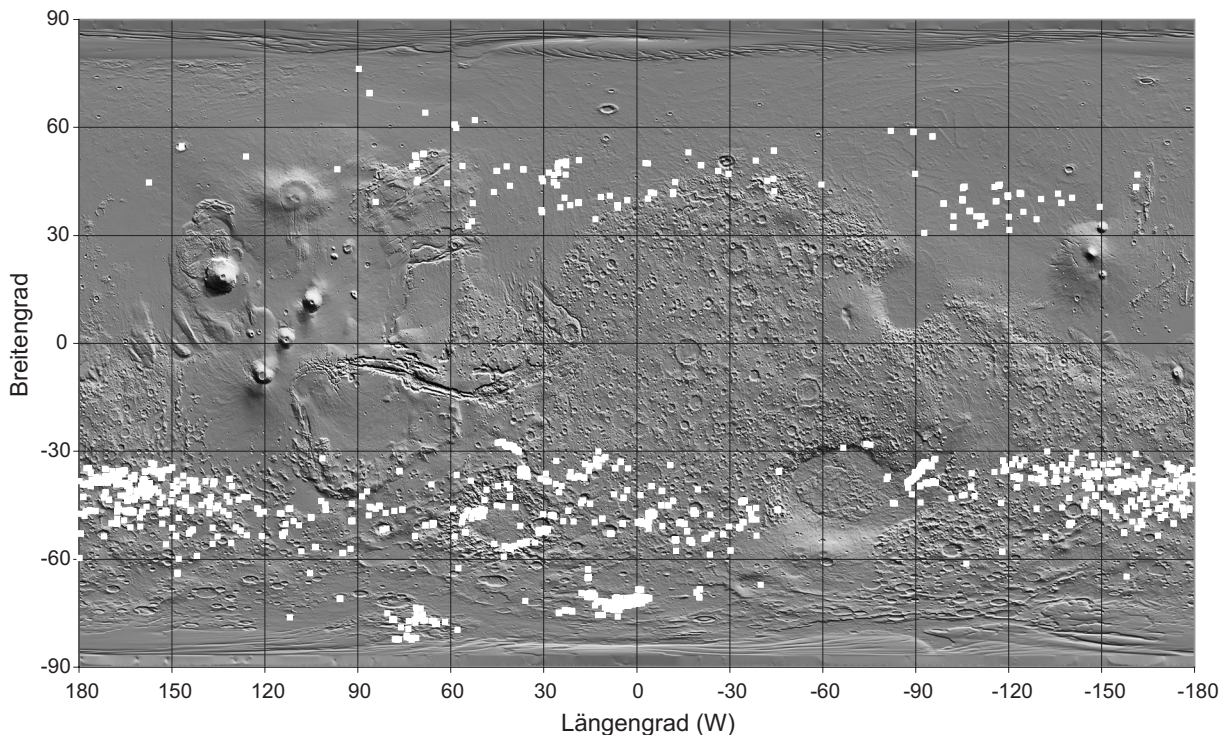


Abb. 57: Globale Verteilung der Erosionsrinnen auf der Basis von 1485 Bildern, die Erosionsrinnen zeigen.

5.3.2 Regionale Verbreitung

Die regionale Zuordnung von Erosionsrinnen hinsichtlich ihrer Verbreitung in einzelnen Kratern, Senken oder Talsystemen ergibt eine Gesamtanzahl von 673 regionalen Hauptverbreitungsgebieten. Auch hier liegen die überwiegenden Vorkommen mit 86,6% in der Südhemisphäre. Dominierend ist die Hauptverbreitung an Kraterhängen mit knapp 83%. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, daß Erosionsrinnen an Hänge gebunden sind und die zahlreichen Krater (vor allem in der südlichen Hemisphäre) den überwiegenden Anteil von Hanggebieten auf dem Mars stellen. Die zweit- und drittgrößten Vorkommen sind an Hügeln (8,3 %) und inneren Kraterhügeln (3 %) zu finden. Die restlichen Vorkommen an Hängen von Dünen, Trockentälern, Senken, Gräben und an Hängen in Chaosregionen sind mit 0,3 - 1,6 % sehr gering. Die Verbreitung von Erosionsrinnen an Dünenhängen ist ausschließlich auf die Südhalbkugel begrenzt. Größere Dünengebiete, vor allem in Kratern, sind auf der südlichen Hemisphäre in mittleren Breiten zwischen 30°S - 60°S in Noachis Terra weit verbreitet, während zirkumpolare Dünen in der nördlichen Hemisphäre dominieren und ausschließlich in Breiten > 80° vorkommen. Größere Dünenfelder gibt es auf der Nordhalbkugel jedoch nicht.

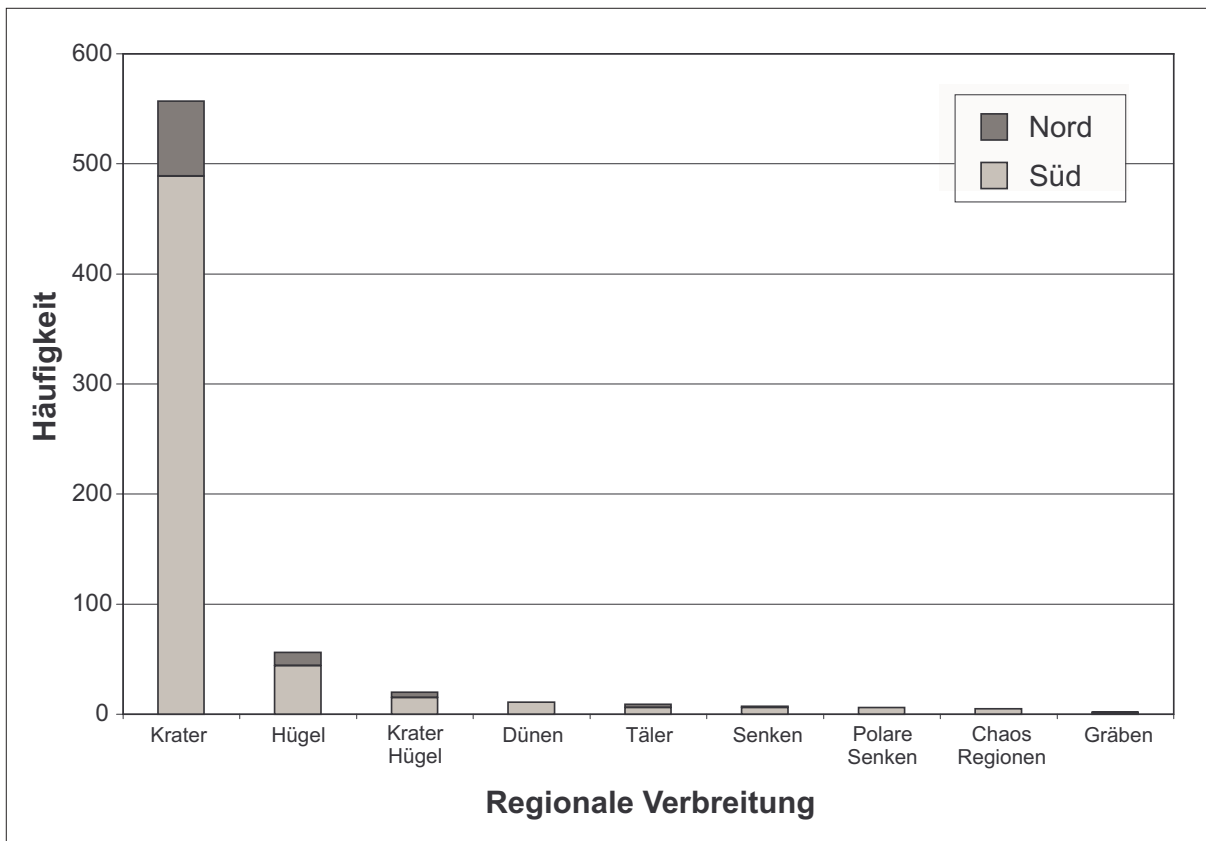


Abb. 58: Verbreitung der Erosionsrinnen.

5.3.3 Globale Häufigkeitsverteilung

Die Erosionsrinnen in den Bilddaten wurden einzeln auskartiert. Dies ermöglicht eine genauere Betrachtung der globalen Verbreitung, da die Häufigkeit der identifizierten Erosionsrinnen in den jeweiligen Bildern starken Schwankungen unterliegt. Insgesamt wurden 26146 einzelne Erosionsrinnen kartiert. Die globale Häufigkeitsverteilung der einzelnen Erosionsrinnen (Abbildung 59), bezogen auf die aufgenommenen Bildflächen in einem Eingradraster in Quadratkilometern, zeigt

hohe lokale Häufigkeitsdichten von > 1 Erosionsrinne/km², die sich auf der Südhalbkugel auf die Gebiete um den Newton Krater (40°S und 158°W), Noachis Terra (40°S und 0°W), Terra Cimmeria (40°S und 200°W) und zwei polare Regionen (70°S und 5°W; 80°S und 70°W) beschränken. Auffällig sind auch hier die geringen Häufigkeitsdichten in dem Breitengradbereich von 60°S - 70° in der südlichen Hemisphäre. Auf der Nordhalbkugel hingegen gibt es nur zwei lokale Gebiete in Utopia Planitia (bei etwa 30°N, 270°W und 40°N, 225°W), die hohe Häufigkeitsdichten (> 1 Erosionsrinne/km²) aufweisen.

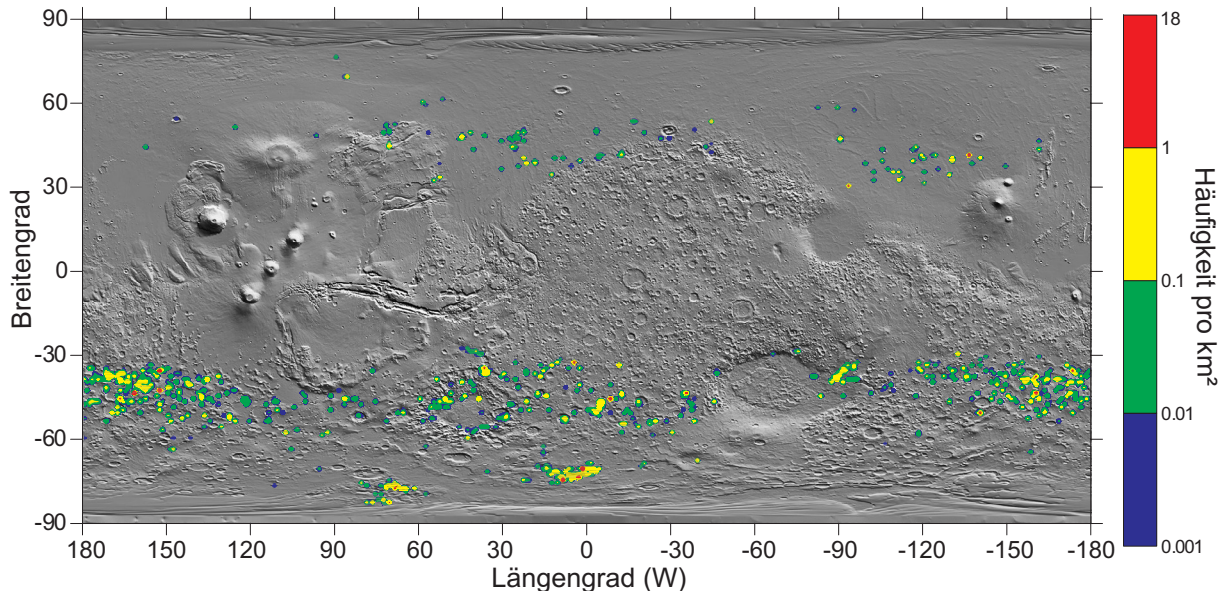


Abb. 59: 1 x 1 Grad Häufigkeitsverteilung von einzelnen Erosionsrinnen pro km² der abgedeckten MOCNA Bildfläche in dem jeweiligen Eingradraster.

5.3.4 Breitengradabhängige Häufigkeit

Die breitengradabhängige Verbreitung der Erosionsrinnen in Bilddaten bezogen auf die prozentuale Häufigkeit in den Bilddaten (Abbildung 60) zeigt Maxima um 70°S - 71°S, 47°S und 35°S - 38°S. Um diese Breitengradbereiche kommen in mehr als 20 % der Bilddaten Erosionsrinnen vor. In der nördlichen Hemisphäre ist die Häufigkeit von Erosionsrinnen weitaus geringer. Das Maximum mit mehr als 5 % wird um den Breitengradbereich von 49°N - 50°N erreicht. Auffällig ist auch hier wieder die sehr geringe Häufigkeit von Erosionsrinnen in einem Bereich zwischen etwa 55°S und 70°S.

Ein ähnliches Bild ergibt sich, wenn man die breitengradabhängige Häufigkeit der einzelnen Erosionsrinnen pro 1000 Quadratkilometer der von Bilddaten abgedeckten Fläche betrachtet (Abbildung 61). Da die prozentuale Häufigkeit von Bildern, die Erosionsrinnen aufweisen, keine Aussage über die reale Häufigkeit zulässt, ist die statistische Erfassung einzelner Erosionsrinnen besser geeignet die breitengradabhängige Verteilung darzustellen, auch wenn bei dieser berücksichtigt werden muß, daß auch diese aufgrund der lückenhaften globalen Abdeckung der hochauflösenden Bilddaten nur eine Annäherung an die Wirklichkeit darstellt. Die Häufigkeits-Maxima von Erosionsrinnen konzentrieren sich in der südlichen Hemisphäre sehr stark auf die Bereiche von 70°S - 71°S, 54°S - 55°S und 37°S - 38°S. In diesen Bereichen liegen die Häufigkeiten zwischen mehr als 50 bis fast 90 Erosionsrinnen pro 1000 km², wobei das Maximum von über 50 Erosionsrinnen pro 1000 km² in dem Breitengradbereich von 54°S - 55°S fast ausschließlich auf das Vorkommen von Erosionsrinnen im Russell Krater Dünenfeld zurückzuführen ist. Auch die extrem große Häufigkeit von fast 90 Erosionsrinnen pro 1000 km² in dem Breitengradbereich von

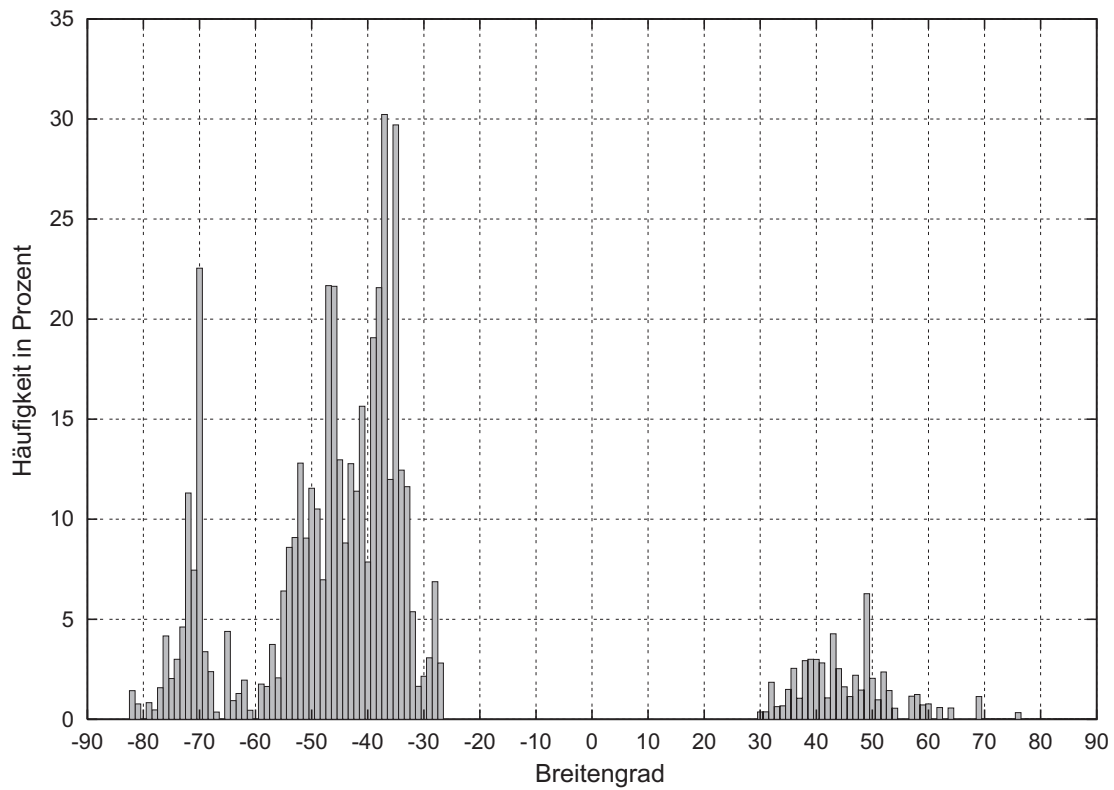


Abb. 60: Prozentuale Häufigkeitsverteilung von Erosionsrinnen in den Bilddaten in Abhängigkeit vom Breitengrad.

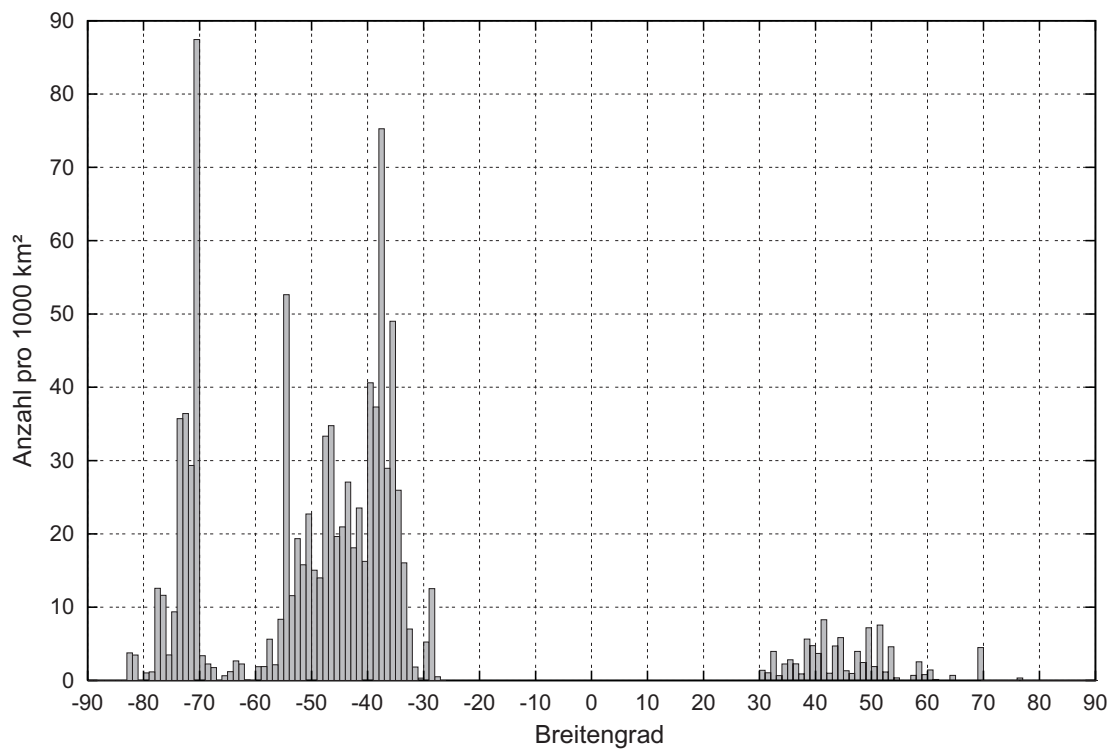


Abb. 61: Anzahl von einzelnen Erosionsrinnen pro Bildfläche (1000 km^2) in Abhängigkeit vom Breitengrad.

70°S - 71°S wird durch regional begrenzte Vorkommen an Hängen von polaren Senken bewirkt. Demgegenüber sind die Vorkommen von über 70 Erosionsrinnen pro 1000 km² in dem Breiten-gradbereich von 37°S - 38°S relativ homogen über den gesamten Längengradbereich verteilt. Die breitengradabhängige Häufigkeit von Erosionsrinnen in der nördlichen Hemisphäre weist keine besonderen Maxima auf. Die Häufigkeit liegt zwischen 30°N - 70°N bei unter 10 Erosionsrinnen pro 1000 km². Auffällig ist aber auch hier das geringe bis nicht vorhandene Vorkommen von Erosionsrinnen in dem Breitengradbereich von etwa 55°N - 70°N.

5.3.5 Asymmetrische Hemisphärenverteilung

Die ungleiche Häufigkeitsverteilung der Erosionsrinnen zwischen der Nord- und Südhemisphäre steht vermutlich in Zusammenhang mit dem geringen Auftreten von höheren Hangneigungsstärken im ebenen, nördlichen Tiefland im Gegensatz zum stark zerkratertem, südlichem Hochland (*Malin und Edgett, 2001*), da das Vorkommen von Erosionsrinnen aufgrund der gravitativen Bildungsmechanismen ausschließlich an Hänge gebunden ist. Diese auf den ersten Blick offensichtliche Beziehung der Erosionsrinnen zu Hangneigungsstärken, wurde anhand von Neigungswerten, die aus dem hochauflösenden MOLA-DEM prozessiert wurden, statistisch überprüft.

Die prozentuale Häufigkeit von Hangneigungsstärken zwischen 10°S - 45° wurde daher mit der Häufigkeitsverteilung der einzelnen Erosionsrinnen in einem Eingrad-Breitengradbereich in Beziehung gesetzt (Abbildung 62). Die Auswahl der Hangneigungsstärken wurde aufgrund des natürlichen Auftretens der Erosionsrinnen auf dem Mars getroffen, die an Hängen von diesen Neigungsstärken anzutreffen sind. Die Hänge der großen Dünenfelder weisen z.B. Neigungen von etwa 10°, die von Kratern zwischen 10°S - 30°, die der großen Talsysteme zwischen 15° - 35° und einzelner Gräben von bis zu 45° auf. Die flachen Hänge der Vulkanregionen, die Hangneigungsstärken zwischen 1° - 10° aufweisen (*Plescia, 2004*), und die Statistik vor allem in dem nördlichen Breitengradbereich von 30°N - 50°N (Alba Patera Vulkankomplex bei 40°N und 110°W mit geringen Neigungen von $\sim 1,2^\circ$ (*Plescia, 2004*)) verfälschen könnten, sind somit in der Häufigkeitsverteilung nicht berücksichtigt.

Die prozentuale Häufigkeit der Hangneigungsstärken und der einzelnen Erosionsrinnen korreliert in den meisten Breitengradbereichen (Abbildung 62). Dies bedeutet, daß die Erosionsrinnen dort häufiger auftreten, wo vermehrt die geeigneten Hangneigungen gegeben sind. Neben dem völligen Fehlen der Formen in dem äquatorialen Breitengradbereich zwischen 27°S - 30°N, treten Erosionsrinnen in einigen Breitengraden weniger oder häufiger auf, als sie durch die ermittelten Häufigkeiten der Hangneigungsstärken eigentlich sollten. Die Häufigkeit von Hangneigungsstärken in der Nordhemisphäre ist zwischen 50°N - 70°N Breite sehr gering und auch Erosionsrinnen treten sehr selten auf. In diesem Breitengradbereich dominieren die extrem flachen Gebiete der nördlichen Tiefebene, die relativ jung sind und auch nur wenige Krater aufweisen. Der Zusammenhang zwischen dem geringen Auftreten von Erosionsrinnen auf der Nordhalbkugel, verursacht durch das geringe Auftreten von Hängen, tritt hier offensichtlich zutage. Zwischen 30°N - 50°N Breite erhöht sich jedoch die Häufigkeit höherer Hangneigungen, wohingegen Erosionsrinnen relativ selten auftreten. Diese Diskrepanz ist so hoch, daß das geringe Auftreten von Erosionsrinnen in diesem Bereich nicht mehr durch das Oberflächenrelief erklärbar ist.

Auch in der Südhemisphäre sind signifikante Abweichungen zu erkennen. Die Häufigkeiten von Erosionsrinnen in den polaren Breiten zwischen 70°S - 73°S sind im Gegensatz zu den auftretenden Häufigkeiten der für die Bildung von Erosionsrinnen geeigneten Hangneigungsstärken etwa um den Faktor 6 höher. Wiederum auffällig ist in dem Breitengradbereich von 55°S - 70°S die geringe Häufigkeit von Erosionsrinnen. Den Häufigkeiten von geeigneten Hängen zufolge müßten Erosionsrinnen dort öfter auftreten. Zwischen 54°S - 55°S treten wieder verstärkt Erosionsrinnen auf, welches auf die sehr hohen Vorkommen im Russell Krater Dünenfeld zurückzuführen ist. Normalverteilt sind die Häufigkeiten von Erosionsrinnen und Hangneigungsstärken zwischen

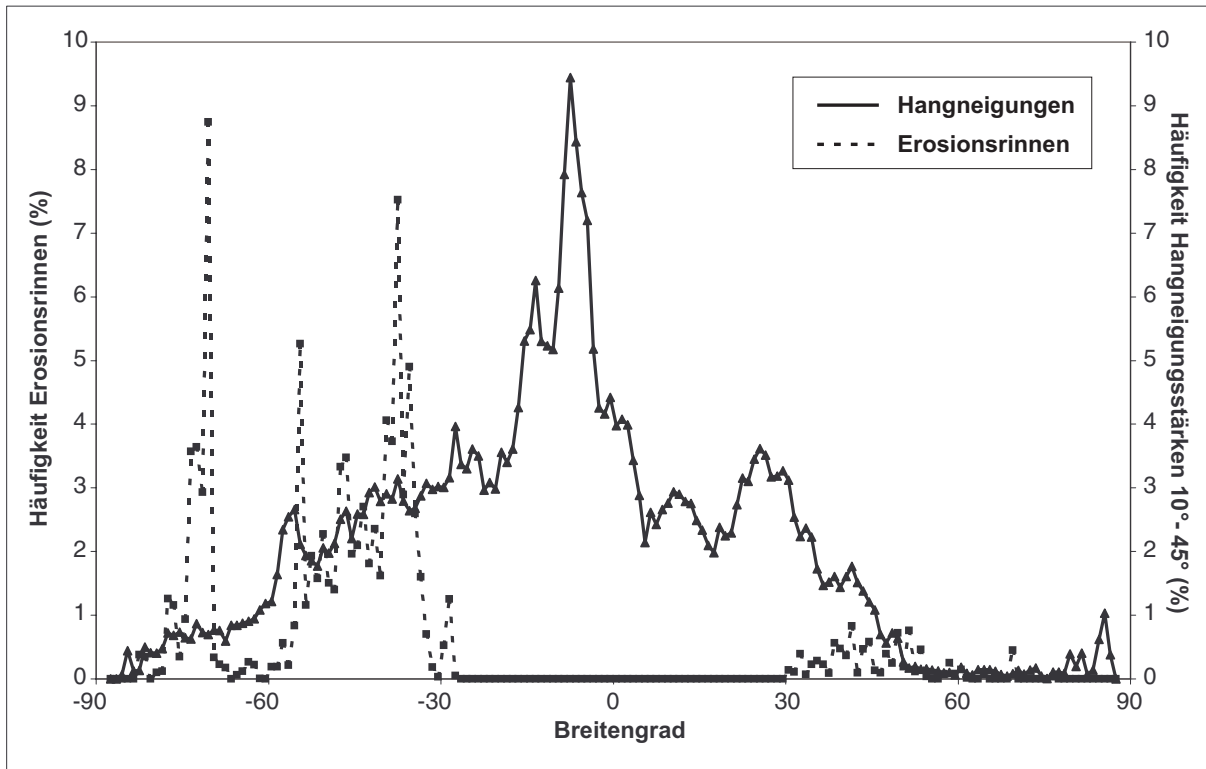


Abb. 62: Häufigkeit von Hangneigungsstärken und Erosionsrinnen gegen den Breitengrad. Die dicke schwarze Linie zeigt den gleitenden Durchschnitt der prozentualen Häufigkeit der Hangneigungsstärken und die dünne Linie der einzelnen Erosionsrinnen.

54°S - 40°S. Zwischen 40°S - 35°S steigen die Häufigkeiten von Erosionsrinnen gegenüber der Häufigkeit der Hangneigungsstärken wieder signifikant an und liegen mehr als doppelt so hoch. Die Erosionsrinnenhäufigkeit nimmt ab einer Breite von etwa 35°S zum Äquator hin rapide ab und erreicht ein Minimum bei 30°S. Geringe Vorkommen im Nirgal Vallis treten dann nur noch zwischen 30°S - 27°S auf.

5.3.6 Absolute Höhenlage

Die Oberflächendrucke hängen in erster Linie von der topographischen Höhe ab. Je höher die Luftmasse über einer Fläche ist umso höher ist der daraus resultierende Oberflächendruck. Neben der topographischen Höhe sind auf dem Mars zudem die saisonalen Druckschwankungen (s. auch Kapitel 2.5.2) beträchtlich. Da der globale, mittlere Oberflächendruck auf dem Mars unter heutigen Klimabedingungen um den Tripelpunkt von Wasser (6,1 mbar) schwankt, sind die absoluten Höhenlagen der Erosionsrinnen von besonderem Interesse, da diese neben den Temperaturen eine der Minimalbedingungen für die vorübergehende flüssige Phase von Wasser ist. Das 6,1 mbar Drucklevel auf dem Mars ist äquivalent zu einer topographischen Höhe von etwa -1600 m bei $L_s=0^\circ$, variiert aber aufgrund der saisonalen Schwankungen vertikal zwischen 1,5-2,5 km innerhalb eines Marsjahres (*Smith und Zuber, 1998*). Das 6,1 mbar Level kann damit unter heutigen Klimabedingungen bis in Höhen von etwa 1000 m erreicht werden. Die absolute Höhenlage der Erosionsrinnen könnte daher Rückschlüsse zulassen, unter der Voraussetzung, daß die Erosionsrinnen mit Hilfe des Agens Wasser gebildet wurden, ob die Druckverhältnisse kurzzeitiges flüssiges Wasser zulassen bzw. inwiefern sie von den Minimaldrücken für flüssiges Wasser abweichen.

Die topographischen Höhen der Quellregionen der einzelnen Erosionsrinnen wurden mit ei-

nem „Skript“ anhand ihrer gemessenen Lage aus dem hochauflösendem MOLA-Höhenmodell (Kapitel 3.2.2) ausgelesen. Da die Lagebestimmung der Erosionsrinnen um wenige Zehntelgrad (Breiten- und Längengrad) von ihrer wirklichen Lage abweicht (aufgrund der ungenauen Lage-daten der Raumsonde zur Zeit der Bildaufnahme, die in der Kartenprojektion der Bilddaten verwendet werden), können die topographischen Höhen nur mit einer Genauigkeit von ± 500 m bestimmt werden. Ein manuelles Nachmessen und Vergleichen mit den ausgelesenen Höhen ergab im Durchschnitt einen Unterschied von $+300$ m zur realen topographischen Höhe. Die Erosionsrinnen sind an Hänge gebunden, so daß in der Mehrzahl der ausgelesenen Höhen das über der Depression liegende Relief und relativ selten das Relief in der Depression bestimmt wurde.

Die Häufigkeit der topographischen Höhen der Quellregionen zeigt für Erosionsrinnen auf der Südhalbkugel zwei Maxima bei etwa 1300 m und bei um 0 m. Den weitaus größten Anteil an den Häufigkeiten um das größere Maximum bei 1300 m topographischer Höhe stellen die polaren Erosionsrinnenvorkommen. Die kleineren Vorkommen auf der Nordhalbkugel liegen zwischen etwa -5000 m - -4200 m topographischer Höhe. Vergleicht man die Maxima der Erosionsrinnenhöhen mit der Höhenverteilung der globalen Topographie des Mars (Abbildung 7), deren 2 Maxima bei -4 km (Nordhalbkugel) und 1-2 km (Südhalbkugel) liegen, fällt auf, daß die Maxima von etwa -4500 m (Nordhalbkugel) und etwa 1300 m (Südhalbkugel) gut mit der globalen Normalverteilung der Topographie zusammenhängen. Demgegenüber liegt der Großteil der Erosionsrinnen in mittleren Breiten ($30^{\circ}\text{S} - 60^{\circ}\text{S}$) der Südhalbkugel auf einer Höhe von etwa 0 m. Diese zur Normalverteilung um 1 km - 2 km niedrigere Höhe ist auch nicht damit zu erklären, daß die Erosionsrinnen in Depressionen vorkommen und daher eine niedrigere Höhe aufweisen müssten. Die Erosionsrinnen sind in mittleren Breiten der südlichen Hemisphäre an Höhen gebunden, die saisonal - unter heutigen Bedingungen- das 6,1 mbar Level überschreiten können.

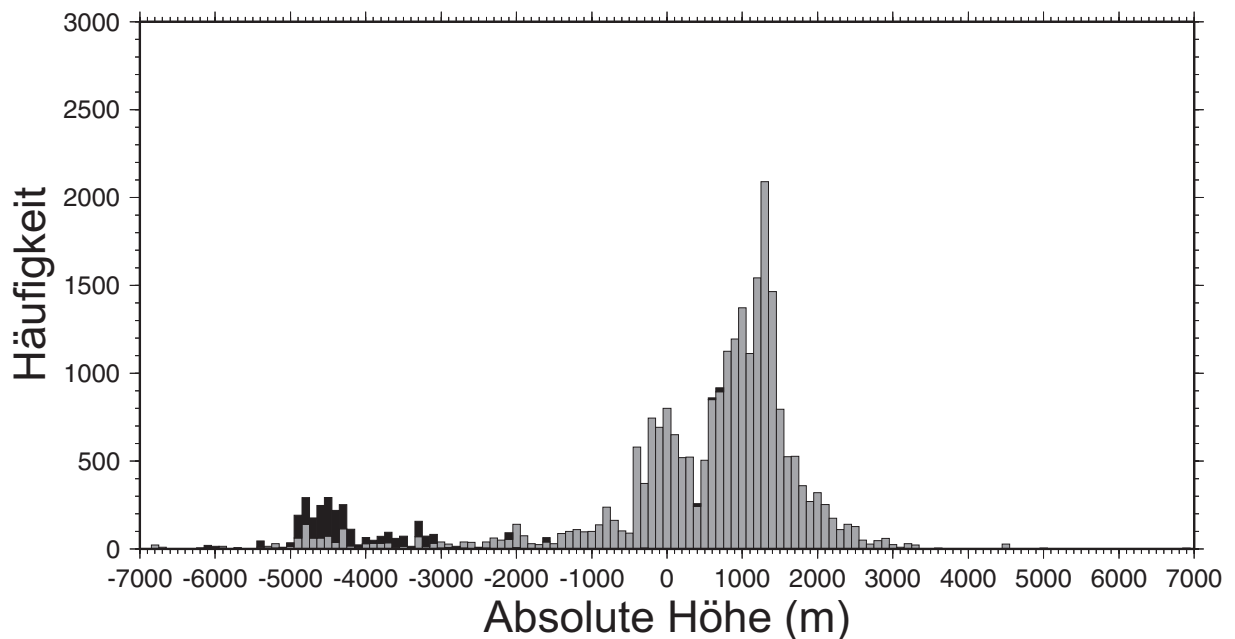


Abb. 63: Prozentuale Häufigkeit der absoluten topographischen Höhe der einzelnen Erosionsrinnen, aufgeteilt nach Vorkommen in der Südhemisphäre (grau) und Nordhemisphäre (schwarz).

5.3.7 Exposition

Die Exposition der Erosionsrinnen kann wichtige Hinweise über die Bildungsbedingungen geben. Bei der Messung der Azimute der einzelnen Erosionsrinnen muß berücksichtigt werden, daß die Datengrundlage der MOC-Bilder die Ergebnisse beeinträchtigen kann. Da die MOC-Bildstreifen

aufgrund der polaren Umlaufbahn der MGS-Sonde in Nord-Süd Richtung verlaufen, werden weitaus mehr Nord- und Südhänge als West- und Osthänge abgedeckt (die Standardbilder weisen eine Länge in NS-Richtung von etwa 25 km und eine Breite in WE-Richtung von etwa 3 km auf). Dadurch kann es zu einer Überinterpretation der NS-exponierten Vorkommen von Erosionsrinnen kommen. Daher muß ein Fehlen oder geringes Vorkommen von Erosionsrinnen an WE-exponierten Hängen in der folgenden Auswertung mit Vorsicht betrachtet werden.

Auf der Nordhalbkugel kommen die meisten der 2020 erfaßten Erosionsrinnen an SSW-exponierten Hängen vor (Abbildung 64). Eine kleinere Häufung tritt zudem an den entgegengesetzten Hängen in NW-Richtung auf. Auf der Südhalbkugel ergibt sich ein anderes Bild: Die meisten Erosionsrinnen kommen an Hängen vor, die nach Süden (von SW bis SE) exponiert sind (Abbildung 64). Eine weitere erwähnenswerte Häufung von Erosionsrinnen kommt an NE-gerichteten Hängen vor.

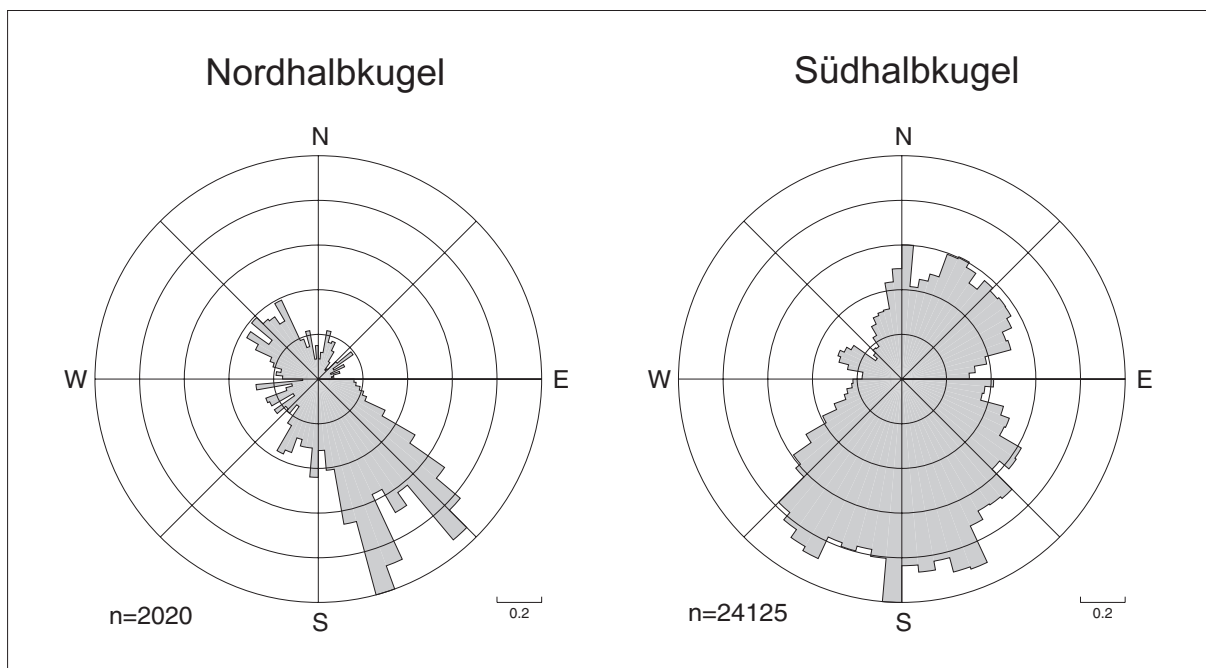


Abb. 64: Azimute der Erosionsrinnen auf der Nord- und Südhalbkugel.

Betrachtet man die prozentuale Häufigkeit der Exposition von Erosionsrinnen auf der Nord- und Südhalbkugel in einer Klassifikationsbreite der vier Himmelsrichtungen in 90° - Einteilungen, zeigt sich, daß etwa 40 % der Erosionsrinnen in beiden Hemisphären an südlich exponierten Hängen vorkommen (Tabelle 11).

Klasse	Exposition	Häufigkeit Nordhalbkugel	Prozent Nordhalbkugel	Häufigkeit Südhalbkugel	Prozent Südhalbkugel
Nord	$315^\circ\text{S} - 45^\circ$	330	16,3	5017	20,8
Ost	$45^\circ\text{S} - 135^\circ$	418	20,7	5781	24
Süd	$135^\circ\text{S} - 225^\circ$	875	43,3	9719	40,3
West	$225^\circ\text{S} - 315^\circ$	397	19,7	3608	14,9
Gesamt	$0^\circ\text{S} - 360^\circ$	2020	100	24125	100

Tab. 11: Exposition der Erosionsrinnen.

5.4 Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

Die Analogien der Erosionsrinnen auf dem Mars zu Formen auf der Erde (s. auch Kapitel 4) ließ bereits *Malin und Edgett* (2000a) vermuten, daß eine Flüssigkeit (Wasser) in dem Prozeß der gravitativen Massenbewegung involviert sein muß, um die typische Morphologie der Formen entstehen zu lassen. Viele Details der Morphologie von Erosionsrinnen auf dem Mars lassen sich nur mit einem Fließprozeß erklären (Abbildung 53):

So verzweigen sich einzelne kleine Rinnen oftmals zu einer Hauptrinne am Oberhang oder die Hauptrinne verästelt sich auf dem Schwemmkegel in mehrere Einzelrinnen (Abbildung 53A und B). Auch das häufig zu beobachtende Mäandrieren und die starke Sinuosität der Rinnen (Abbildung 53C) ist nur durch viskose Fließbewegungen zu erklären. Ein weiteres starkes Indiz für Fließbewegungen, und damit für das Vorhandensein einer Flüssigkeit beim Bildungsprozeß, sind laterale Ablagerungen (*levées*) an den Rinnenrändern (Abbildung 53D). Die Morphologie der Erosionsrinnen deutet auf eine Bildung durch ein flüssiges Medium hin. Trockene Massenbewegungen, wie von *Treiman* (2003) und *Shinbrot et al.* (2004) vermutet, sind nicht in der Lage, die speziellen Merkmale wie Sinuosität, Verzweigungen und laterale Ablagerungen, die die Erosionsformen aufweisen, zu bilden. Auch die starke Tiefenerosion, ersichtlich in den teilweise sehr tief eingeschnittenen Rinnen (Abbildung 53E) ist nicht mit trockenen Massenbewegungen zu erklären, da die erosiven Kräfte zu gering sind, um tiefe Rinnen einzuschneiden. Die Morphologie der Formen scheint eher durch einen wiederkehrenden Prozeß von gravitativen Fließbewegungen an den Hängen gebildet worden zu sein, der durch die episodischen, periodischen oder saisonalen Ereignisse ausreichend Zeit hatte seine erosiven Kräfte wirken zu lassen, um die tiefen Rinnen (*gullies*) zu formen. Hinweise auf mehrfache Fließereignisse sind z.B. in Form von überfahrenen Schwemmkegeln zu finden (Abbildung 53F).

Die stark unterschiedlichen Morphologien der Alkoven rühren wahrscheinlich von der variierenden Zusammensetzung des anstehenden Gesteins bzw. des daraus hervorgegangenen Hangschutts an den global weitverstreuten Hängen. Die regionale, lithologische Diversität führt auch auf der Erde zu unterschiedlichen Morphologien von Erosionsrinnen, die sich auf die Länge, Breite und Volumina, und damit auch Morphologie, auswirken (*van Steijn et al.*, 1988b). Deutlich erkennbar ist diese Beziehung in der speziellen morphologischen Ausprägung von Erosionsrinnen an Dünenhängen (Abbildung 51F), die vermutlich aufgrund des homogenen Sandmaterials zu kleinen Alkoven am Dünenkamm und dem fast völligen Fehlen von Ablagerungen in Form von Schwemmkegeln führt (vgl. auch Kapitel 8.1). Eine sicherlich wichtige Rolle spielen aber auch die vorherigen wahrscheinlich glazialen-periglazialen Hangprozesse, die an vielen Hängen in mittleren und polaren Breiten wirkten und die nachträgliche Bildung und Formung der Erosionsrinnen beeinflussten (Abbildung 51C, F und H). Die Erosionsrinnen in Abbildung 51 C, D und E sind in vermutlich einst wassereishaltiges Mantelmaterial eingeschnitten und weisen dadurch eine spezielle Morphologie auf. Zudem könnten diese glazialen Mantelablagerungen aufgrund des hohen Wassereisanteils die Bildung der Erosionsrinnen durch Eisschmelze ausgelöst haben. Die Vergesellschaftung dieser beiden Formen deutet darauf hin, daß glaziale/periglaziale Prozesse in diesen Regionen eine größere Rolle spielten, jedoch vor der Bildung der Erosionsrinnen, da diese die glazialen/periglazialen Formen überlagern bzw. am Hang überformt haben.

Flüssiges Kohlendioxid ist unter heutigen Bedingungen auf dem Mars wie wahrscheinlich auch in der Vergangenheit nicht stabil, da hierzu Atmosphärendrucke von über 5 bar überschritten werden müssen. Diese Druckbedingungen könnten aber aufgrund des lithostatischen Druckes in einer Tiefe von etwa 100 m (*Mussekwhite et al.*, 2001) erreicht werden. Dagegen spricht jedoch die häufige Austrittstiefe von Erosionsrinnen direkt an den Hangoberkanten bzw. Oberflächen (*Baker*, 2001; *Cabrol et al.*, 2001) und die Tatsache, daß gerade in den polaren Gebieten, in denen CO₂ bedingt durch die niedrigen Temperaturen unter heutigen klimatischen Bedingungen stabil ist und sich im Untergrund angereichert haben könnte, die Austrittstiefen nach

eigenen Beobachtungen ausschließlich direkt an der Reliefoberkante beginnen (vgl. Abbildungen 51E und 53C). Auch die Bildung von CO₂-Hydraten ist unwahrscheinlich, da diese sehr instabil sind und wenn überhaupt nur bedingt durch lithostatischen Druck, in großen Tiefen gebildet werden können. Gasförmige CO₂-Suspensionsströme ausgelöst durch Sublimation von einer Oberflächenfrostbedeckung sind unwahrscheinlich, da bei fortschreitender Jahreszeit und ansteigenden Temperaturen das CO₂ langsam in die Atmosphäre sublimieren würde und keine Kräfte ausüben würde, die Bodenmaterial mitreißen und eine lineare Erosion bedingen würden. Der Austritt von gasförmigem CO₂ im Untergrund aufgrund lithostatischen Druckes würde morphologisch hingegen Formen bilden, die pyroklastischen Strömen auf der Erde ähneln (*Stewart und Nimmo, 2002*) und nicht mit der Morphologie der Erosionsrinnen auf dem Mars vereinbar wären. Insgesamt betrachtet ist die Bildung von Erosionsrinnen durch das Medium CO₂ oder CO₂-Hydrate wegen der geringen Mengen, die im Untergrund theoretisch angereichert werden könnten (*Stewart und Nimmo, 2002*) unwahrscheinlich sowie nicht mit der Morphologie und den Austrittstiefen vereinbar.

Wasser ist damit das einzige Medium, welches auf dem Mars in der flüssigen Phase vorkommen könnte. Unter den heutigen Klimabedingungen kann flüssiges Wasser aufgrund der Druck- und Temperaturverhältnisse nicht dauerhaft stabil sein, kurzfristige flüssige Phasen von Wasser können aber nicht ausgeschlossen werden (*Hecht, 2002; Kossacki, 2003*) und könnten in der frühen Vergangenheit, bei höheren Druck- und Temperaturbedingungen sowie höheren Wassergehalten in der Atmosphäre auch häufiger gewesen sein.

Auf Sickerwasseraustritte im Untergrund weisen Austrittstiefen von Erosionsrinnen in einigen 100 m Tiefe in mittleren Breiten zwischen 30°S und 60° hin. Auch weisen Formen auf dem Mars wie z. B. Rampart-Krater (siehe Kapitel 2.4) darauf hin, daß in der Vergangenheit, wie auch rezent, Grundeis und Grundwasseraquifere auf dem Mars existiert haben könnten. Jedoch beginnen viele Erosionsrinnen direkt an der Oberfläche. Dies widerspricht der Theorie, daß die Bildungsprozesse durch Sickerwasseraustritte ausgelöst wurden. Zudem können die Entstehungszonen der Erosionsrinnen in einer Tiefe von bis zu einigen hundert Metern auch damit erklärt werden, daß unkonsolidierte Schuttmassen sich vorwiegend in den unteren Hangbereichen ansammeln. Dadurch weisen diese Bereiche günstige Bildungsvoraussetzungen auf, da Schuttströme auf unkonsolidiertes Material angewiesen sind und das anstehende, konsolidierte Gestein in den oberen Hangbereichen wenig Angriffsfläche bietet. Ein anderer exogener, klimatischer Einfluß könnte darin liegen, daß in tiefer gelegenen Hanglagen, bedingt durch die geschütztere Lage vor zu starker Insolation im Gegensatz zu den oberen Hangbereichen, größere Mengen von Wassereis akkumulieren. Dies würde dann bei Schmelzen des abgelagerten Wassereises zu Erosionsrinnenbildung in den unteren Hangbereichen führen. Lokal oder regional sind Sickerwasseraustritte an Hängen aber nicht auszuschließen und könnten zur Bildung von Erosionsrinnen beigetragen haben. Geothermales Schmelzen von Grundeis ist zwar theoretisch möglich, aber die Verbreitung zeigt keinerlei Korrelationen zu einstigen, vulkanisch aktiven Zentren auf dem Mars und ist daher sehr unwahrscheinlich. Zudem spricht wieder die häufige Austrittstiefe der Erosionsrinnen am Hangbeginn gegen diese Theorie.

Konsistent mit den Auswertungen der Verbreitung wie auch Exposition ist ein exogener, klimatischer Einfluß, der die Bildung von Erosionsrinnen auslöst. Die Vorkommen beschränken sich auf mittlere und hohe Breitengradbereiche zwischen etwa 30°S und 75°S in beiden Hemisphären und zeigen Breitengradabhängige Schwankungen, die auf günstigere Bildungsvoraussetzungen zur Zeit ihrer Entstehung in diesen Bereichen hinweisen. In äquatorialen Gebieten kommen keine Erosionsrinnen vor. Dies stimmt mit der Instabilität von oberflächennahem Wassereis (*Farmer und Doms, 1979*) sowie geringer Wasserdampfkonzentrationen in der Atmosphäre in äquatorialen Breiten unter heutigen klimatischen Bedingungen überein. Demgegenüber sind oberflächennahes Wassereis in mittleren und hohen Breiten ganzjährig stabil, und relativ hohe Wasserdampfkonzentrationen in diesen Breitengradbereichen zeigen einen saisonalen Austausch

zwischen der Atmosphäre und der Oberfläche an. Modellierungen unter der Annahme von höheren Achsenneigungen des Mars, die als Hauptauslöser für klimatische Schwankungen auf dem Mars angesehen werden (siehe Kapitel 2.5.5), zeigen für die jüngere Vergangenheit die Stabilität von oberflächennahem Wassereis in mittleren und hohen Breiten und eine atmosphärische Umverlagerung von hohen zu mittleren Breiten an.

Die Breitengradabhängige Häufigkeit der Erosionsrinnen im Vergleich zu den Häufigkeiten von Hangneigungsstärken in den einzelnen Breitengradbereichen ist ein Maß für begünstigte und ungünstige Entstehungsgebiete von Erosionsrinnen, da diese an Hänge gebunden sind und Abweichungen von der Normalverteilung der Hangneigungsstärken Hinweise auf klimatisch bevorzugte Breitengradregionen gibt. Positive Abweichungen von der Normalverteilung der Hangneigungsstärken sind auf der Südhalbkugel vor allem in drei Breitengradbereichen um $37,5^{\circ}\text{S}$, $54,5^{\circ}\text{S}$ und $70,5^{\circ}\text{S}$ zu beobachten. In diesen Regionen müssen die klimatischen Bedingungen zur Entstehungszeit der Erosionsrinnen besonders günstig gewesen sein. Negative Abweichungen von der Normalverteilung bzw. ungünstige Bildungsbedingungen zeigen auf der Südhalbkugel die Breitengradregionen zwischen 55°S - 70°S und 27°S - 31°S . Die geringen Vorkommen von Erosionsrinnen auf der Nordhalbkugel sind in hohen Breiten auf die geringe Häufigkeit von Hangneigungsstärken in den nördlichen Tiefländern zurückzuführen. In dem Breitengradbereich zwischen 30°N und 55°N hingegen müßte die Anzahl bedingt durch die höhere Häufigkeit von geeigneten Hangneigungsstärken jedoch höher sein. Diese Breitengradregion scheint daher ungünstige Voraussetzungen für die Bildung von Erosionsrinnen aufgewiesen zu haben.

Die Exposition der Erosionsrinnen, die auf der Südhalbkugel vorwiegend an den kälteren polzugewandten und auf der Nordhalbkugel an den wärmeren äquatorzugewandten Hängen vorkommen, deutet auf zwei Faktoren hin: Zum einen beeinflusst die Insolation an unterschiedlich ausgerichteten Hängen die Temperaturverhältnisse, die für das Schmelzen von Wassereis nötig sind und zum anderen auch die Deposition von Wasserdampf aus der Atmosphäre. An den geschützten, kälteren Hängen können sich größere Mengen Wassereis aus der Atmosphäre ablagern und verbleiben bei fortschreitender Jahreszeit länger dort, weil sie vor direkter Insolation geschützt sind. Bei den allgemein sehr tiefen Temperaturen auf dem Mars muß aber auch der Schmelzpunkt von Wassereis überschritten werden. Die Exposition der Erosionsrinnen scheint daher abhängig zu sein von dem Temperaturregime an Hängen, die einerseits eine Deposition größerer Mengen von Wassereis aus der Atmosphäre zulassen und andererseits durch Insolation Temperaturen erreichen, die das abgelagerte Wassereis schmelzen können. Unter heutigen Bedingungen auf dem Mars werden Temperaturen von über 273 K nur auf der Südhalbkugel erreicht, wohingegen auf der Nordhalbkugel ganzjährig Temperaturen unter 273 K herrschen. Die unterschiedliche Exposition der Erosionsrinnen in beiden Hemisphären wäre mit dem heutigen, unterschiedlich ausgeprägtem Klima in der Nord- und Südhemisphäre erklärbar. Auf der Südhalbkugel kommen die Erosionsrinnen überwiegend an den kälteren, polzugewandten Hängen vor, da die Deposition von Wassereis aus der Atmosphäre überwiegend an den geschützten Hängen stattfindet bzw. bei steigenden Temperaturen das Wassereis an den ungeschützten Hängen wieder sublimiert. Auf der Nordhalbkugel lassen die heutigen Temperaturverhältnisse eine Deposition von Wassereis an allen Hängen zu, aber ein Schmelzen von Wassereis würde aufgrund der direkten Sonneneinstrahlung eher an den wärmeren, äquatorzugewandten Hängen stattfinden. Insgesamt zeigen die Erosionsrinnen eine bevorzugte Exposition, die aber nicht auf alle Formen zutrifft. Dies und die heutigen Temperaturverhältnisse auf der Nordhalbkugel, die ein Schmelzen von Wassereis eher unwahrscheinlich erscheinen lassen, könnten auf einen Klimawandel auf dem Mars hindeuten.

Die beiden Hemisphären auf dem Mars zeigen damit eine deutliche Asymmetrie von begünstigten und ungünstigen Klimabedingungen hinsichtlich der Breitengradverteilung wie auch in der unterschiedlichen Hauptexposition der Erosionsrinnen. Dies ist aber auch nicht verwunderlich und ein weiteres starkes Indiz für eine klimatisch gesteuerte Entstehung der Erosionsrinnen,

da die Exzentrizität der Umlaufbahn des Mars um die Sonne eine unterschiedliche Ausprägung der Jahreszeiten - auch in der Vergangenheit - in den Hemisphären mit sich bringt (siehe Kapitel 2.2 und 2.5). Unter heutigen klimatischen Bedingungen sind die südlichen Winter länger und kälter und die südlichen Sommer wärmer und kürzer als in der nördlichen Hemisphäre. Die Maximaltemperaturen auf der Südhalbkugel können bis zu einer Breite von etwa 73°S mit über 273 K den Taupunkt von Wassereis erreichen, während die Temperaturen im nördlichen Sommer maximal 260° bei einer Breite von 30°N erreichen (*Haberle et al.*, 2001). Die Ausprägung der Jahreszeiten in den Hemisphären verändert sich aufgrund von Schwankungen der Exzentrizität, so daß es ca. alle 100.000 Jahre zu einer Umkehr in der Intensität der jahreszeitlichen Ausprägung zwischen der Nord- und Südhalbkugel kommt.

Wenn es noch zu rezenten Bildungen von Erosionsrinnen kommen sollte, dann wären diese aufgrund der klimatischen Bedingungen nur in der südlichen Hemisphäre denkbar, da dort Maximaltemperaturen von über 273 K erreicht werden. Die geringen Wassermengen in der Atmosphäre lassen rezente Bildungen, wenn überhaupt, wahrscheinlich nur in hohen Breiten ($\sim \geq 45^{\circ}$) der südlichen Hemisphäre zu, da größere Ablagerungsmengen von Wassereis in niedrigeren Breiten sehr unwahrscheinlich sind. In diesen Bereichen tritt saisonal auch Frostbedeckung auf und oberflächennahes Wassereis kommt ab einer Breite von ca. 40° bis zu den Polen ganzjährig vor. Für die Bildung von rezenten Erosionsrinnen kommt aber nur saisonal als Frost abgelagertes Wassereis aus der Atmosphäre oder den oberen Zentimeter der Oberfläche in Frage, da die Temperaturverhältnisse nur ein Schmelzen von Wassereis der oberen Zentimeter zulassen würde. Interessant sind in diesem Zusammenhang die topographischen Höhen der Erosionsrinnenvorkommen im südlichen Hochland, die in den meisten Fällen saisonale Oberflächendrucke von über 6,1 mbar zulassen und mit den südlichen Maximaltemperaturen jahreszeitlich zusammenfallen. Theoretisch ist damit nicht ausgeschlossen, daß flüssiges Wasser auch heute noch saisonal, aber tageszeitlich auf die warmen Mittagsstunden begrenzt, lokal auftreten könnte.

5.5 Schlußfolgerungen

1. Die Morphologie der Erosionsrinnen kann nur durch einen Fließprozeß gebildet werden. Weder trockene Massenbewegungen noch gasförmiges oder flüssiges CO_2 ist mit der Morphologie, den physikalischen Rahmenbedingungen oder den Entstehungszonen der Erosionsrinnen vereinbar. Da keine anderen flüssigen Medien auf dem Mars in Betracht kommen, muß flüssiges Wasser an der Bildung der Erosionsrinnen beteiligt gewesen sein.

2. Sowohl die Verbreitung als auch die Exposition der Erosionsrinnen deuten auf einen starken klimatischen Einfluß bei der Bildung der Erosionsrinnen hin. Das Klima scheint die Bildung von Erosionsrinnen einerseits durch Insolation und andererseits durch die globale wie auch lokale Deposition und Stabilität von Wassereis mit nachfolgender flüssiger Phase auszulösen.

3. Das Schmelzen von oberflächennahem Bodeneis, Frost oder Schnee, entstanden durch Deposition aus der Atmosphäre, ist daher der wahrscheinlichste Entstehungsprozeß der Erosionsrinnen. Da nicht alle Erosionsrinnen durch den gleichen Prozeß entstanden sein müssen, können auch Sickerwasseraustritte aus Aquiferen als zusätzlicher Bildungsprozeß nicht ausgeschlossen werden. Schmelzen von Grundeis bedingt durch geothermale Erwärmung hingegen ist sehr unwahrscheinlich, da keine Lagekorrelation zu vulkanisch aktiven Gebieten auftritt.

4. Einige Breitengradbereiche zeigen erhöhte oder verringerte Häufigkeiten von Erosionsrinnen gegenüber den statistischen Häufigkeiten von Hangneigungsstärken in diesen Breitengradbereichen. Erhöhte Bildungsaktivitäten treten in der südlichen Hemisphäre in Breitengraden um $37,5^\circ\text{S}$, $54,5^\circ\text{S}$ und $70,5^\circ\text{S}$ auf, während die Bereiche zwischen 55°S und 70°S sowie 27°S und 31°S sehr geringe Häufigkeiten aufweisen. Die geringen Vorkommen in der nördlichen Hemisphäre sind in hohen Breiten ($> 55^\circ\text{N}$) auf die geringen Hangneigungsstärken in der nördlichen Tiefebene zurückzuführen. In mittleren Breiten zwischen 30°N und 55°N treten jedoch statistisch sehr geringe Häufigkeiten auf, die nicht mit den geringen Hangneigungsstärken der nördlichen Tiefebene zu erklären sind. Möglicherweise spiegelt die schwankende Breitengradhäufigkeit klimatisch günstige und ungünstige Regionen wider.

5. Theoretisch nicht auszuschließen sind rezente Bildungen von Erosionsrinnen in hohen Breiten von etwa 45°S bis 73° , da in diesen Regionen unter heutigen Bedingungen, abhängig von der Höhenlage, Drücke von mehr als 6,1 mbar und Temperaturen von über 273 K im südlichen Hochsommer gleichzeitig erreicht werden können. Die begrenzenden Faktoren sind hierbei aber die geringen Wasserdampfmengen, die sich aus der Atmosphäre an der Oberfläche niederschlagen können und die geringen Eindringtiefen der Temperaturen in den Marsuntergrund. Zudem müssen die Frostlagen so lange vor direkter Sonneneinstrahlung, die eine hohe Evaporationsrate nach sich ziehen würde, geschützt sein, bis die Temperaturen ein Schmelzen von Wassereis ermöglichen.

