

7 Relative Altersbestimmung der Erosionsrinnen im Nirgal Vallis

Transversaldünen bedecken den Talboden von Nirgal Vallis, einem 670 km langem longitudinalen Talsystem im zerkraterten Hochland des Mars bei 42°W und 29°S. Die Dünen sind überdeckt von kleinen Einschlagskratern. Dies zeigt, daß die Dünen unter heutigen Klimabedingungen auf dem Mars inaktiv sind. Die letzte zurückliegende Aktivitätsphase der Dünen (absolutes Alter) kann durch Krateranschlagsgrößen-Häufigkeitsverteilungen bestimmt werden. Die Dünen sind wiederum überdeckt von Erosionsrinnen-Schwemmkegeln. Die folgende absolute Altersbestimmung der Dünen ergibt sich durch die relative Altersüberlagerung der Erosionsrinnen im Nirgal Vallis eine obere Altersgrenze für die Entstehungszeit der Erosionsrinnen in dieser Region.

7.1 Lage des Untersuchungsgebiets

Nirgal Vallis befindet sich im Südlichen Hochland südöstlich des Valles Marineris und nördlich des Argyre Einschlagbeckens bei etwa 42°W und 29°S. Das gestreckte Talsystem hat eine Gesamtlänge von 670 km und mündet in das Uzboi Vallis. Die Talbreiten betragen zwischen 2 km im Oberlauf und 10 - 12 km im Unterlauf. Die Tiefen reichen von 200 m im Oberlauf und bis zu 1200 m im Unterlauf. Die Morphologie von Nirgal Vallis weist alle Charakteristiken von „sapping valleys“ (s. Kapitel 2.4.1), wie z.B. amphitheater-ähnliche Talanfänge (Quellnischen), U-förmige Talquerprofile, strukturtektonische Kontrolle, hängende Täler und geringe Entwässerungsdichten auf (*Baker, 1982; Carr, 1996; Reiss, 2001*).

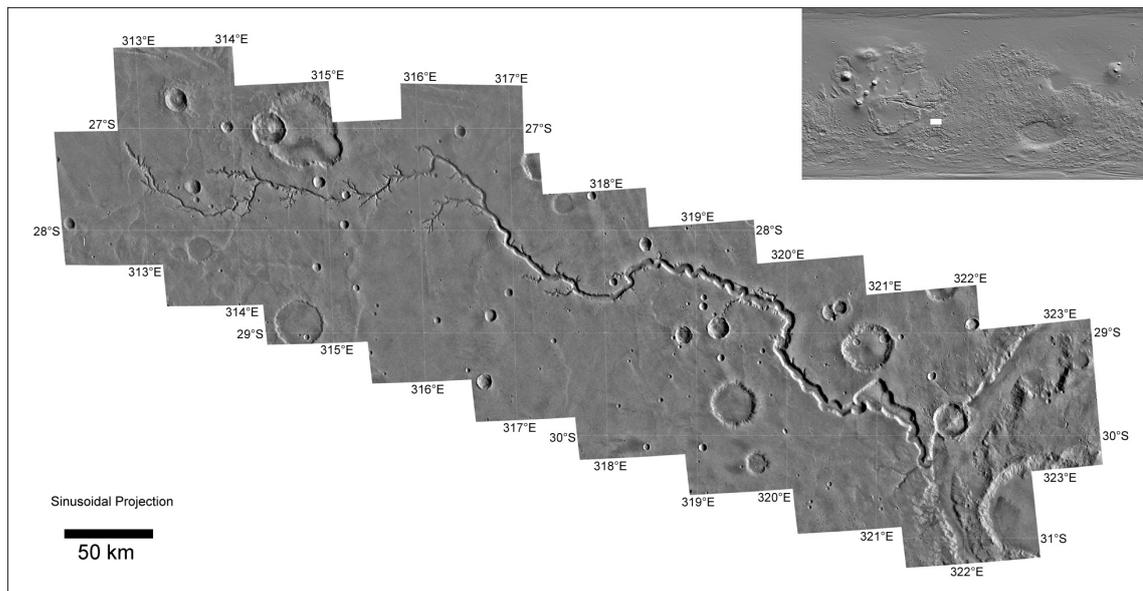


Abb. 75: Viking Orbiter Bildmosaik von Nirgal Vallis (aus Viking Bildnummern F466A49 - A66 und F467A07).

Das Tal durchschneidet von seiner Quellregion bis zum Mündungsbereich drei geologische Einheiten (*Scott und Tanaka, 1986*): Hpl₃, Npl₁, Npl₂ und wiederum Npl₁ (Abbildung 76). Die Unterteilung dieser Einheiten wurde anhand von großflächigen Kraterzählungen und von morphologischen Eigenschaften der Oberfläche aus Viking Bildmosaikern und Einzelbildern vorgenommen (*Scott und Tanaka, 1986*). Die älteste Einheit, die das Nirgal Vallis durchschneidet, ist die „cratered unit“, die als Npl₁ bezeichnet wird und im südlichen Hochland weit verbreitet ist. Das Material dieser Einheit wurde in der Periode des starken Meteoritenbombardements

gebildet und besteht wahrscheinlich aus einer Mischung von Lavadecken, pyroklastischem Material und Impaktbrekzien. Kleinere Talsysteme treten in dieser Einheit häufig auf, was sich mit Untersuchungen zum Alter der Talsysteme deckt. Danach bildeten sich die meisten Täler in der Anfangsphase der Entwicklung des Mars, nachdem sich die Kraterereinschlagsrate vor ca. 3,9 Milliarden Jahren abrupt verringerte (Carr und Clow, 1981). Ebenfalls vom Alter zum Noachian gehörend, jedoch jünger als Npl₁, ist die Einheit Npl₂ (subdued cratered unit), die vom Mittellauf des Nirgal Vallis durchschnitten ist. Sie unterscheidet sich von der „cratered unit“ vor allem durch die geringere Kraterereinschlagsdichte. Interpretiert werden die Oberflächenmaterialien als dünne eingebettete Lavadecken und äolische Ablagerungen, die die darunterliegenden Gesteine teilweise überdecken. Die jüngste Einheit, die vom Nirgal Vallis eingeschnitten wurde, ist die „smooth unit“ (Hpl3). Für die Entstehung dieser Einheit wird aufgrund der Kraterereinschlagsdichte das frühe Hesperian angenommen. Kennzeichnend für die Einheit ist die Formung von großen, flachen und relativ merkmalslosen Ebenen in den südlichen Hochländern. Häufig überdeckt sie lokal ältere Einheiten. Die Oberfläche wird als mächtige eingebettete Lavadecke und äolische Depositionen, die auch das anstehende Gestein überdecken, interpretiert. Kraterzählungen der Talbodenfläche von Nirgal Vallis, basierend auf Viking-Orbiter Bildern, deuten auf ein noachisches Alter des Talsystems (Carr und Clow, 1981) von etwa 3,8 Ga hin (Reiss, 2001).

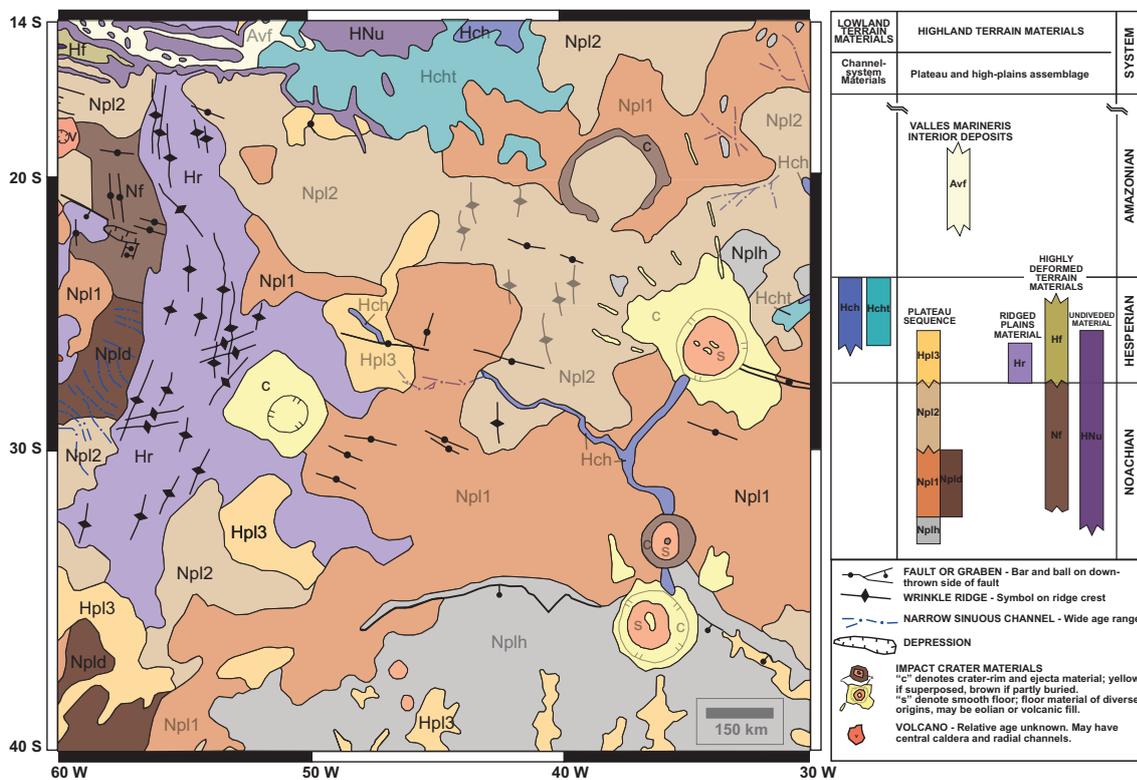


Abb. 76: Geologische Karte der Umgebung von Nirgal Vallis nach (Scott und Tanaka, 1986) aus (Reiss, 2001).

7.2 Dünen

Weite Bereiche des Talbodens von Nirgal Vallis sind von Dünen bedeckt (Abbildung 77). Es sind Transversaldünen, die charakterisiert sind durch ihre quer verlaufende Längsrichtung zu den vorherrschenden Winden. Die Wellenlänge zwischen den einzelnen Dünenkämmen variiert zwischen 10 m bis 120 m. Bei diesen Dimensionen ist es angebracht, ausgehend von der Erdliteratur, sie als Dünen und nicht als Wind-Rippel, die kleinere äolische Formen mit Wellenlängen

zwischen 0,1 m to 10 m bilden (*Summerfield, 1991; Jacobshagen et al., 2000*), zu bezeichnen. Die Lagerichtung der Dünen im gesamten Nirgal Vallis (Haupt- und Seitentäler) deutet auf vorherrschende Winde parallel zum Talverlauf hin (*Reiss, 2001; Zimelman, 2003*).

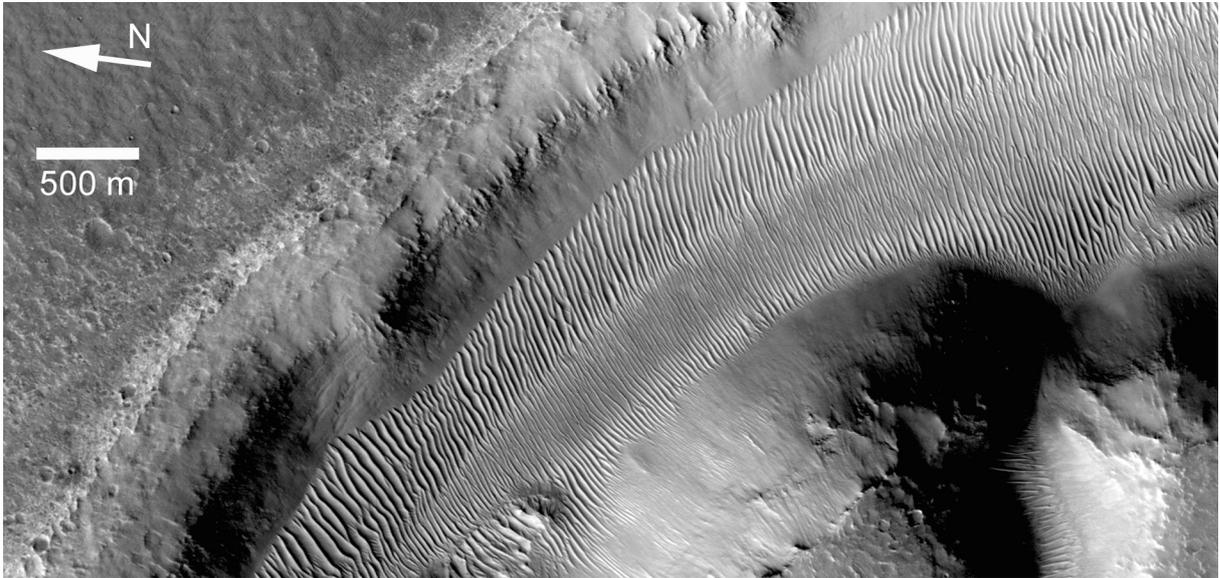


Abb. 77: Transversaldünen bedecken die Talsohle von Nirgal Vallis (M0003117 bei $42,73^{\circ}\text{W}$ und $27,79^{\circ}\text{S}$, $2,8\text{ m/pxl}$).

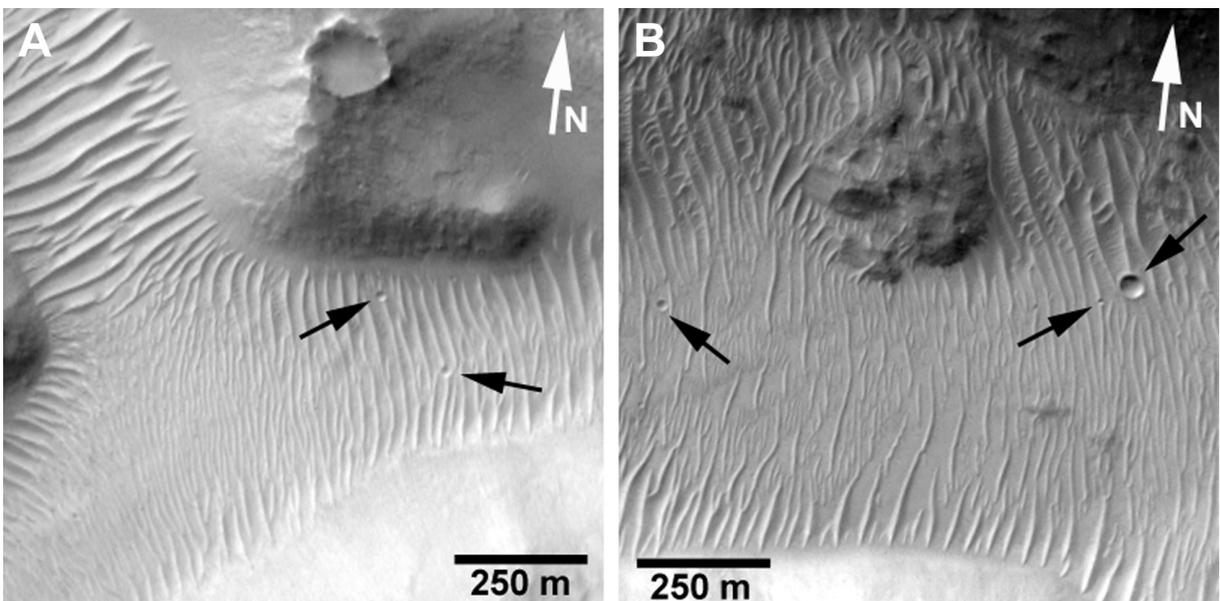


Abb. 78: Krater überlagern die Dünen (A: E0202651 bei $43,34^{\circ}\text{W}$ und $27,83^{\circ}\text{S}$, $2,82\text{ m/pxl}$; B: E0101142 bei $44,84^{\circ}\text{W}$ und $27,61^{\circ}\text{S}$, $2,81\text{ m/pxl}$).

Kleine Einschlagskrater auf den Dünen zeigen deutlich, daß diese unter den heutigen klimatischen Bedingungen inaktiv sind (Abbildung 78). Auch die ähnliche Albedo zur Umgebung weist auf Inaktivität der Dünen hin, da diese wahrscheinlich von einer Staubschicht bedeckt sind (s. Kapitel 2.4.6). Auf eine dünne Staubschicht auf den Dünen weist ebenso die Auswertung von thermalen Infrarotbildern vom Thermal Emission Imaging System (THEMIS) der Mars Odyssey Mission hin, die bestimmte Temperaturdifferenzen zwischen Tag- und Nachtaufnahmen zeigen,

die möglicherweise von einer dünnen Staubschicht (< 1 cm) verursacht wird (Zimbelman, 2003).

7.3 Erosionsrinnen

Erosionsrinnen kommen im Nirgal Vallis häufig vor. Von 88 hochauflösenden MOC-NA Bildern, die das Talsystem abdecken, sind in 35 (40 %) Erosionsrinnen identifizierbar. Das Vorkommen von Erosionsrinnen im Nirgal Vallis ist das einige größere Cluster in niedrigen Breiten von $< 30^\circ$ und damit das nächstgelegene zum Äquator. Sie kommen fast über das gesamte Talsystem vor, jedoch ausschließlich an den polzugewandten Hängen. Nahezu alle Schwemmkegel der Erosionsrinnen überlagern Dünen (Abbildung 79).

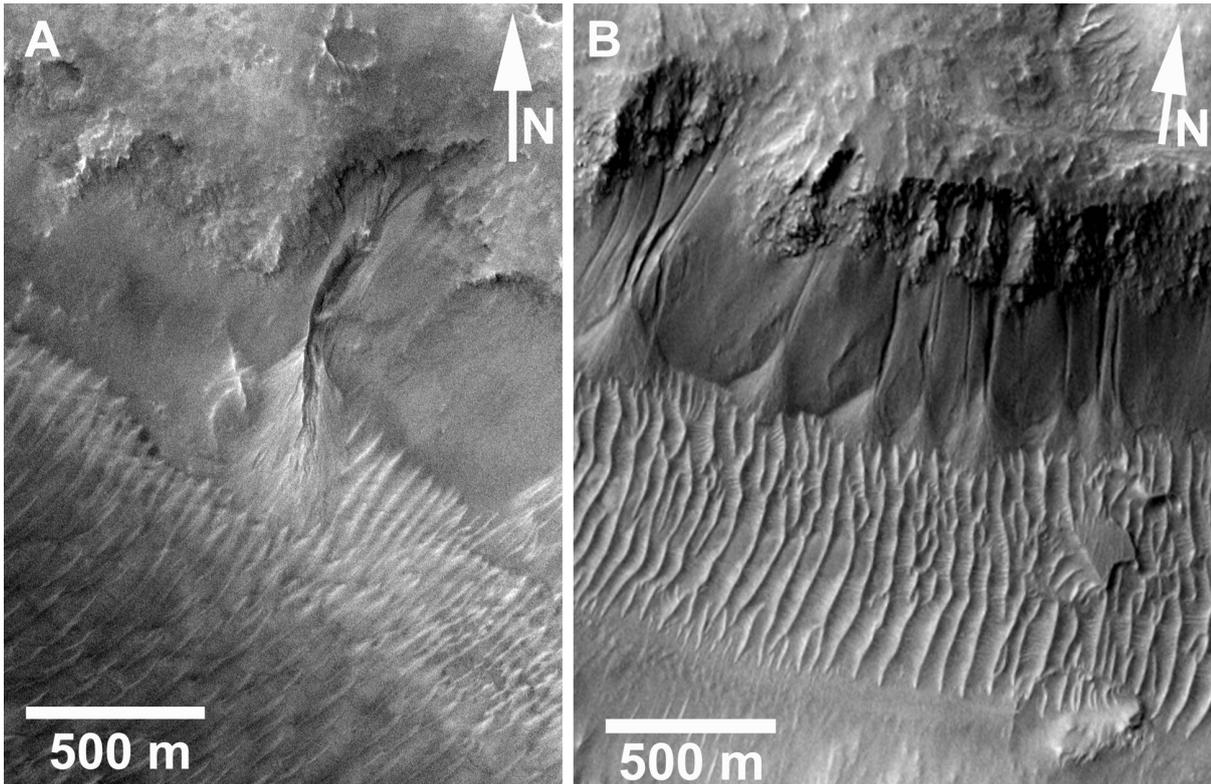


Abb. 79: Schwemmkegel der Erosionsrinnen überlagern die Dünen (A: E1302187 bei $39,4^\circ$ W und $29,32^\circ$ S, $1,47$ m/pxl; B: E0501789 bei $41,65^\circ$ W und $28,71^\circ$ S, $4,23$ m/pxl).

Die Entstehungsgebiete der Erosionsrinnen im Nirgal Vallis beginnen zwischen ~ 220 m bis ~ 600 m unter der Oberfläche (Gilmore und Phillips, 2002; Reiss und Jaumann, 2002). Dies könnte auf Sickerwasseraustritte im Untergrund hinweisen (Malin und Edgett, 2000a). Gilmore und Phillips (2002) fanden zwischen der Austrittstiefe der Erosionsrinnen und der geologischen Einheiten eine Korrelation. Fraglich ist jedoch, ob die Korrelation mit geologischen Einheiten nicht eher zufällig ist, da diese keine Aussagen über den Untergrund einschließen, sondern anhand der Morphologie und Kraterhäufigkeiten aus Oberflächen-Bilddaten kartiert wurden. Geologische Karten vom Mars sind daher eher als morpho-interpretative Karten zu bezeichnen (Jöns, 1993), die durch Kraterhäufigkeitsverteilungen die Stratigraphie mit einschließen. Reiss und Jaumann (2002) zeigten, daß die Austrittstiefe der Erosionsrinnen von 220 m im Oberlauf bis 600 m im Unterlauf liegt und mit der Taltiefe korreliert (Abbildung 80). Diese Korrelation könnte auf fossile Grundwasseraquifere hinweisen, welche im Untergrund, vielleicht sogar noch aus Zeiten eines wärmeren und feuchteren Mars, erhalten geblieben sind. Eine andere Möglichkeit ist, daß unkonsolidiertes Schuttmaterial an den Hängen, welches Grundvoraussetzung zur

Bildung von Schuttströmen ist, erst in diesen Tiefen beginnt und konsolidiertes Gestein dieses überlagert. Desweiteren könnte die Korrelation durch die Depositionsrate von Wassereis aus der Atmosphäre an den geschützteren Hangbereichen in Abhängigkeit von der Tiefe verursacht werden. Letzteres würde das ausschließliche Vorkommen der Erosionsrinnen an den kälteren, polabgewandten Hängen im Nirgal Vallis erklären. Die starke Abhängigkeit des Auftretens von Erosionsrinnen von der Sonneneinstrahlung in diesen relativ niedrigen Breitengraden könnte ein weiteres Indiz für diese Vermutung sein.

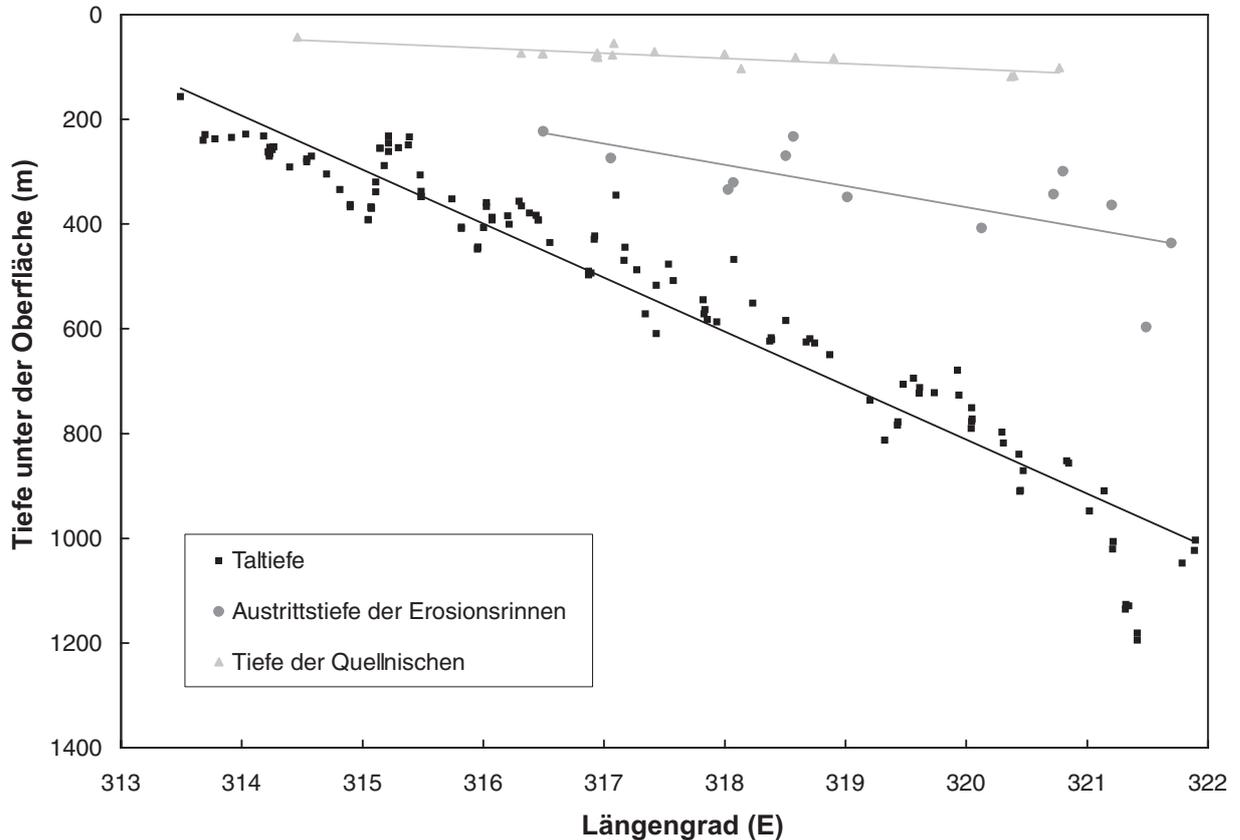


Abb. 80: Austrittstiefe der Erosionsrinnen im Nirgal Vallis (Reiss und Jaumann, 2002). Die Tiefe der Entstehungsgebiete der Erosionsrinnen (Kreise) liegt zwischen der Tiefe der Quellnischen von Seitentälern des Nirgal Vallis und der Taltiefe des Nirgal Vallis. Die Tiefe der Quellnischen unter der Oberfläche zeigt die ungefähre Tiefe von Sickerwasseraustritten (Lage der Aquifere) zu Zeiten der Talentstehung an. Tiefenerosion schnitt nachfolgend das Haupttal ein. Die Austrittstiefe der Erosionsrinnen könnte auf regionale, fossile Aquifere hinweisen, die in diesen Tiefen nach der Talentstehung erhalten blieben.

7.4 Methodik

Für genaue Statistiken von Kratergrößen-Häufigkeitsverteilungen wurden alle 88 MOC-NA Bilder mit Auflösungen zwischen 1.4 m-5.6 m (Subphasen M00-R02), die das Nirgal Vallis abdecken, mit einbezogen (Tabelle 16). Einige Bilder konnten aufgrund von Bildfehlern, Bildqualität, Sekundärkratern oder wegen Fehlens von Dünen nicht ausgewertet werden. Auf den verbleibenden 69 Bildern wurden die Dünengebiete auskartiert und Kraterzählungen durchgeführt. Die Abdeckung und Lage aller Bilder unter Berücksichtigung der Erosionsrinnen sind in Abbildung 81 dargestellt.

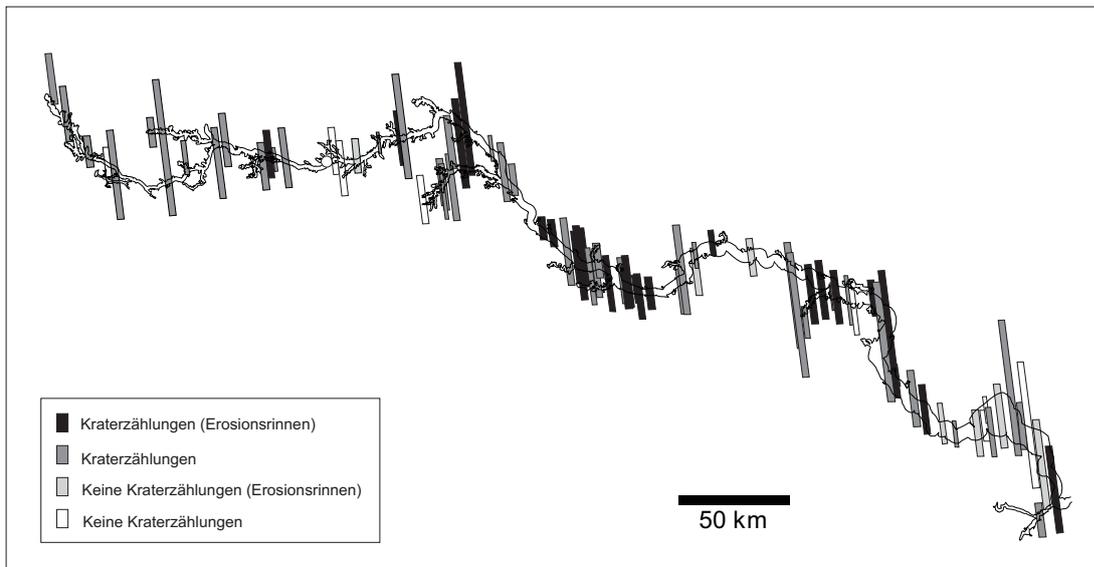


Abb. 81: Bildflächen aller MOC-NA Bilder (Subphasen M00-R02), die das Nirgal Vallis abdecken. Bildstreifen sind in Abhängigkeit zum Vorkommen von Erosionsrinnen in den einzelnen Bildern in unterschiedlichen Graustufen markiert.

Die Altersdatierung der Dünen wurde separat für vier Haupt-Bildaufösungen und alle Bildaufösungen zusammen vorgenommen, da bei unterschiedlichen Bildaufösungen die erkennbaren Kraterdurchmesser variieren. Noch erkennbare Kraterdurchmesser liegen bei ca. 3 (besser 5) Bildpunkten, so daß bei einer Bildauföfung von 2,8 m/pxl noch Kraterdurchmesser von ca. 9 m (14 m) im Bildmaterial zu erkennen sind. Aufgrund der Unsicherheiten in Zusammenhang mit der Auslöschung kleinerer Krater durch Erosions- und Depositionsprozesse wurde neben dem besten Modell-Alter (best fit) ein oberes Modell-Alter (upper limit) bestimmt, indem die größte Kraterdurchmesser-Klasse und eine fiktive, nächstgrößere Kraterdurchmesser-Klasse angenommen wurde.

Bildnummer	Breite	Länge (W)	Bildauf- lösung (m/pxl)	Erosions- rinnen	Krater- zählung	Dünen- fläche (km ²)	Krater- anzahl (≥10m)	Krater (≥10m/km ²)
M0002226	-28,71	39,96	1,39	nein	ja	7,38	6	0,81
M0003117	-27,79	42,73	2,8	nein	ja	6,00	3	0,50
M0100047	-29,77	38,22	5,59	nein	nein	-	-	-
M0200823	-28,69	39,95	1,4	nein	ja	5,72	4	0,70
M0202070	-29,76	38,87	1,4	nein	nein	-	-	-
M0300609	-27,65	44,79	1,4	nein	ja	0,93	2	2,15
M0301843	-27,49	43,7	2,8	ja	ja	3,34	1	0,30
M0302290	-29,71	38,99	2,8	ja	nein	-	-	-
M0306129	-28,64	40,05	2,79	ja	ja	3,99	3	0,75
M0307448	-29,76	38,68	2,79	ja	nein	-	-	-
M0400321	-27,05	46,7	2,8	nein	ja	1,10	0	0,00
M0400785	-28,41	42,18	2,8	ja	ja	9,70	0	0,00
M0401736	-27,56	45,77	5,6	nein	ja	5,87	1	0,17
M0402208	-28,57	41,29	2,8	nein	ja	2,77	0	0,00
M0700752	-29	39,46	4,2	ja	ja	27,04	12	0,44
M0701695	-27,38	43,13	5,6	ja	ja	6,82	0	0,00
M0702005	-29,62	38,47	2,8	ja	nein	-	-	-
M0702618	-27,32	46,58	2,8	nein	ja	6,81	19	2,79
M0703024	-28,55	42,06	2,8	nein	ja	7,69	4	0,52
M0704589	-28,56	41,14	2,8	ja	nein	-	-	-
M0705583	-27,64	44,7	4,2	nein	ja	2,49	1	0,40
M0802808	-27,76	42,81	2,8	nein	ja	20,95	3	0,14
M0804330	-27,71	46,23	1,4	nein	nein	-	-	-
M0804942	-28,6	41,74	2,8	ja	ja	3,57	1	0,28
M0806252	-27,68	45,28	2,8	nein	ja	6,16	1	0,16
M0900923	-28,73	39,82	1,4	nein	ja	6,16	4	0,65
M0902135	-27,93	43,32	2,8	nein	ja	2,10	0	0,00
M1000594	-27,52	43,89	1,4	nein	ja	2,75	2	0,73
M1000808	-29,46	39,24	1,4	nein	ja	3,80	2	0,53
M1001562	-27,57	42,91	1,4	nein	ja	2,07	3	1,45
M1101204	-27,87	43,24	2,79	nein	ja	3,29	4	1,22
M1102236	-28,41	42,12	2,79	ja	ja	6,35	5	0,79
M1201186	-28,53	42,15	4,2	ja	ja	8,94	2	0,22
M1201691	-27,59	45,57	2,8	nein	ja	2,43	4	1,65
M1302039	-27,52	43,27	2,8	nein	ja	3,74	0	0,00
M1302185	-29,75	38,55	2,79	nein	ja	8,90	7	0,79
M1400333	-28,54	42,01	4,19	nein	ja	7,58	4	0,53
M1401369	-28,81	39,77	2,8	nein	nein	-	-	-
M1700623	-29,4	38,39	4,2	nein	ja	11,17	4	0,36
M1900386	-28,61	41,91	4,2	ja	ja	5,83	2	0,34
M1901953	-28,94	40,19	2,8	nein	ja	1,52	1	0,66
M2000713	-29,58	39,15	4,2	ja	ja	11,21	18	1,61
M2100952	-28,66	41,93	4,21	ja	nein	-	-	-
M2101443	-28,59	41,78	2,81	nein	ja	5,43	1	0,18
M2202304	-28,61	41,75	2,81	ja	ja	4,04	2	0,49
E0100646	-27,61	44,08	2,81	ja	nein	-	-	-
E0101142	-27,61	44,84	2,81	ja	ja	2,15	4	1,86
E0201072	-27,72	44,21	2,83	nein	nein	-	-	-
E0202651	-27,83	43,34	2,82	nein	ja	7,76	2	0,26
E0202853	-29,06	39,51	4,24	nein	ja	27,14	14	0,52
E0300451	-27,72	44,89	2,82	nein	ja	3,70	4	1,08
E0302052	-28,41	40,67	4,22	ja	nein	-	-	-
E0400504	-28,89	40,26	4,21	nein	ja	3,88	1	0,26
E0500443	-30,19	37,99	2,83	ja	ja	18,55	23	1,24
E0501123	-28,71	39,93	4,24	ja	ja	7,60	1	0,13
E0501789	-28,71	41,65	4,23	ja	ja	2,13	0	0,00
E0502916	-27,4	43,68	5,89	nein	ja	2,68	0	0,00
E0901933	-28,5	41,28	4,43	nein	ja	6,78	0	0,00

E0902603	-27,79	46,17	4,43	nein	ja	4,25	0	0,00
E1000063	-28,37	42,27	2,95	nein	ja	7,35	1	0,14
E1001486	-29,5	39,25	2,94	nein	ja	9,60	6	0,63
E1002335	-27,59	44,28	2,94	nein	nein	-	-	-
E1002705	-28,69	40,3	4,41	nein	ja	3,65	0	0,00
E1003549	-27,5	45,22	4,41	nein	ja	3,08	3	0,97
E1100243	-28,45	42,16	5,88	ja	ja	6,56	0	0,00
E1100613	-29,99	38,1	4,41	ja	nein	-	-	-
E1101564	-27,53	43,18	4,41	ja	ja	11,80	3	0,25
E1103619	-27,71	44,89	2,95	nein	ja	3,98	3	0,75
E1200133	-28,59	41,77	1,48	ja	ja	4,24	1	0,24
E1201191	-29,58	38,6	1,47	nein	nein	-	-	-
E1300087	-28,39	41,16	1,47	nein	ja	2,23	1	0,45
E1301534	-29,7	38,61	2,94	nein	nein	-	-	-
E1302187	-29,32	39,4	1,47	ja	nein	-	-	-
E1400616	-28,29	41,01	1,47	ja	ja	5,36	5	0,93
E1401328	-28,65	41,68	1,48	ja	ja	1,50	1	0,67
E1401698	-27,61	46,4	2,95	nein	ja	4,36	2	0,46
E1401837	-28,22	42,4	2,95	ja	ja	7,24	3	0,41
E1401994	-29,7	38,28	4,42	nein	ja	6,67	1	0,15
E1600027	-27,43	45,85	2,94	nein	ja	2,83	4	1,41
E1601912	-28,71	39,61	4,42	ja	ja	9,53	4	0,42
E1700132	-28,68	40,15	4,42	ja	ja	9,43	1	0,11
E1701529	-28,68	41,56	2,94	ja	ja	2,75	0	0,00
E1800043	-28,43	42	2,94	nein	ja	6,50	4	0,62
E1801758	-27,96	43,52	4,42	nein	nein	-	-	-
E1900611	-27,85	43,32	3,38	nein	ja	5,26	2	0,38
E2201333	-28,19	42,48	2,93	ja	ja	5,16	1	0,19
E2201453	-30,39	38,12	5,87	nein	ja	0,85	1	1,18
E2300175	-28,54	41,92	3,61	ja	nein	-	-	-
Σ 88						Σ 432,17	Σ 222	\emptyset 0,51

Tab. 15: Zusammenfassung der hochauflösenden MOC-Bilder (Subphasen M00-R02), die das Nirgal Vallis abdecken.

7.5 Ergebnisse und Unsicherheiten

Die besten Modell-Alter der unterschiedlichen Bildauflösungen variieren zwischen 140.000 und 380.000 Jahren, während die oberen Modell-Alter zwischen 390.000 Jahren und 1,4 Millionen Jahre schwanken (Abbildung 82 und Tabelle 16). Dies weist auf eine sehr kurz zurückliegende letzte Aktivitätsphase der Dünen und eine noch jüngere Entstehungsphase der Erosionsrinnen im Nirgal Vallis hin.

Bildauf- lösung (m/pxl)	Dünen- fläche (km ²)	Krater- anzahl (≥ 10 m)	Krater (≥ 10 m/km ²)	Retentions- Alter (N1) ^a (beste)	Retentions- Alter (N1) ^a (obere)	Modell- Alter (beste in Ma)	Modell- Alter (obere in Ma)
1.4	42.13	31	0.74	1.25E-07	1.55E-07	0.256	0.317
2.8	197.06	118	0.60	1.87E-07	6.64E-07	0.384	1.363
4.3	170.20	71	0.42	1.38E-07	3.37E-07	0.283	0.691
5.6	22.78	2	0.09	9.37E-08	1.43E-07	0.139	0.293
all	Σ 432.17	Σ 222	\emptyset 0.51	1.59E-07	3.03E-07	0.327	0.621

Tab. 16: Zusammenfassung der ermittelten Alter für die einzelnen Klassifikationen der MOC-Bilder und für alle Bildauflösungen zusammen. ^aN(1) ist die kumulative Anzahl von Kratern mit Durchmesser gleich oder größer als 1 km pro Quadratkilometer. Die N(1) Werte wurden nicht aus Messungen ermittelt. Die kleineren Kratergrößen wurden errechnet aus den 1 km Kratergrößen durch Anwendung der Neukum Krater-Standardhäufigkeitsverteilung (Standard Frequency Distribution SFD).

Ungenauigkeiten in den Kraterstatistiken könnten durch atmosphärische Effekte beim Ein-

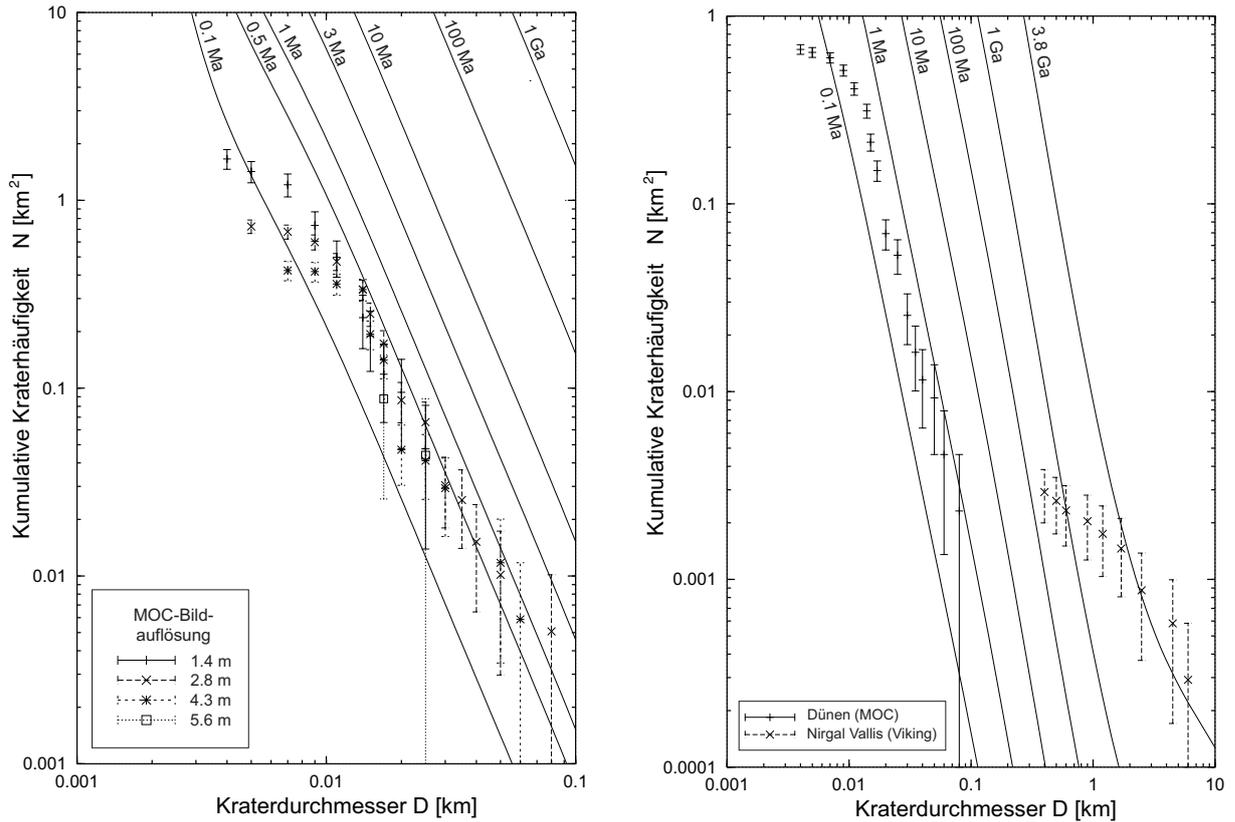


Abb. 82: Ergebnisse der Kratermessungen für die letzte Aktivitätsphase der Dünen im Nirgal Vallis. (Links) Ergebnisse der Kratermessungen für die einzelnen Klassifikationen der Bildauflösungen. (Rechts) Ergebnisse der Kratermessungen für alle Bildauflösungen zusammen (Dünen in MOC-NA) und für das Nirgal Vallis, basierend auf Viking Bildern (Abbildung 75) (Figure 1) (Reiss, 2001).

tritt von Boliden verursacht werden. Meteoriten können beim Eintritt, je nach Größe, aufgrund der Aufheizung durch die Reibung beim Durchqueren der Atmosphäre, zerkleinert oder gar ganz zerstört werden. Dies würde die Kraterstatistiken verfälschen. Die hochauflösenden MOC-NA Bilder zeigten erstmals Populationen von kleinen Einschlagskratern, die zurückreichen auf Durchmesser von bis zu 11 m (Malin et al., 1998; Hartmann, 1999). Diese kleinen Kraterdurchmesser kommen auch auf den Dünen im Nirgal Vallis vor. Atmosphärische Eintrittskalkulationen von Boliden zeigen, daß Krater von weniger als 1 m Durchmesser auf dem Mars erwartet werden können (Hörz et al., 1999). Berechnungen von Popova et al. (2003) ergaben, daß die kleinsten Kraterdurchmesser auf dem Mars unter heutigen Atmosphärenbedingungen im Bereich zwischen 0,3 m bis 8 m, abhängig von ihrer Zusammensetzung (Eisen-, Steinmeteoriten oder Kometen) und der Festigkeit der Meteoriten, zu erwarten sind. Bei höheren Oberflächendrücken als heute wären die Abweichungen von der Kratergrößen Standard- Häufigkeitsverteilung (SFD) vernachlässigbar und erst von Bedeutung, wenn die Oberflächendrücke 30 mbar überschreiten würden (Popova et al., 2003). Die Kraterstatistiken zur Altersbestimmung der Dünen im Nirgal Vallis basieren auf Kratergrößenklassen > 14 m Durchmesser. Bei Kraterdurchmesserklassen von weniger als 11 m sind „Knicke“ in der Häufigkeitsverteilung in Abbildung 82 ersichtlich, die durch die geringere Sichtbarkeit von kleineren Kratern aufgrund der zunehmenden Auflösungsgrenze im Bildmaterial verursacht wird. Insgesamt sind die Ungenauigkeiten in der Kraterstatistik aufgrund von möglichen atmosphärischen Effekten auf die Kratergrößenverteilung bis zu Oberflächendrücken von 30 mbar gering und dürften die Kratermessungen daher nicht beeinflussen.

Ein weiterer Ungenauigkeitsfaktor sind Erosions- und Depositionsprozesse, die Krater verfüllen und auslöschten können. Dies würde zu einer Verflachung der Kratergrößenverteilung führen, die auch als „Öpik effect“ bezeichnet wird (Öpik, 1965, 1966). Diese Prozesse sind bei Kratern, die auf unkonsolidiertem Material vorkommen, wirksamer als auf konsolidiertem Gesteinsmaterial (Hörz *et al.*, 1999). Desweiteren führen Erosion und/oder Deposition zu einer schnelleren Auslöschung von kleineren Kraterdurchmessern (Hartmann, 1998). Auslöschungseffekte von kleinen Kratern (< 100 m) auf dem vermutlich unkonsolidierten Dünenmaterial im Nirgal Vallis können zu unterschätzten Kraterzählungen und damit jüngeren Altern führen.

In-situ Messungen von Staubdepositionsraten auf der Oberfläche von Sojourner (Mars-Rover) an der Pathfinder Landestelle ergaben $\sim 4 \times 10^{-4}$ cm/a (Rover Team, 1997). Hartmann (1966b, 1971) schätzte die mittlere Netto-Depositionsraten in Kraterböden auf 10^{-4} cm/a. Unter der Annahme, daß die Dünen 3 Millionen Jahre alt sind, würde sich bei den oben gegebenen Raten eine Nettodeposition zwischen 3 m bis 12 m ergeben. Bei Nutzung eines Tiefe-Durchmesser Krater-Verhältnisses von 0,2 (Strom *et al.*, 1992), würden Krater mit Durchmessern zwischen 15 m bis 60 m innerhalb von 3 Millionen Jahren ausgelöscht. Zudem würde es bei den gegebenen Netto-Depositionsraten zwischen 4,5 Millionen Jahren bis 18 Millionen Jahren dauern, um den größten, gemessenen Krater von 90 m Durchmesser auszulöschen. Desweiteren entsteht nach der heutigen Kratereinschlagsrate alle ~ 1 Million Jahre ein neuer Krater mit einem Durchmesser von 90 m auf der untersuchten Dünenfläche von 432,17 km² im Nirgal Vallis. Das Auftreten von nur einem 90 m Kraterdurchmesser auf der gesamten Dünenfläche weist deshalb sehr stark darauf hin, daß Auslöschungprozesse die Kraterstatistiken nicht beeinflussen. Die „frisch“ aussehenden, rundlich und scharf geformten Kratereinschläge auf den Dünenflächen (auch die kleinen Krater mit Durchmessern von ~ 20 m erscheinen nicht degradiert), deuten darauf hin, daß sie keinen oder nur sehr geringen Degradationsprozessen ausgesetzt waren. Die Netto-Depositionsraten in diesem Gebiet scheinen in der jüngeren Vergangenheit sehr gering gewesen zu sein. Zusätzlich ist kein signifikantes Abflachen der Kratergrößenverteilung zu erkennen (Abbildung 82), welches der Fall wäre, wenn die Nettodepositionsraten hoch genug gewesen wären und die kleineren Krater schneller ausgelöscht hätten als die größeren.

Kraterpopulationsstudien im *Meridiani Planum* von Lane *et al.* (2003) auf THEMIS- und MOC-Bildmaterial zeigen ein Abflachen der mittelgroßen ($\sim 63 \text{ m} < D < 1 \text{ km}$) Kraterdichtekurven aufgrund von Erosions- und/oder Depositionsprozessen, aber kein Abflachen der kleineren (< ~ 90 m) Kraterverteilung. Dies deutet auf eine Lücke größerer Kraterauslöschung in dieser äquatorialen Region hin (Lane *et al.*, 2003). Die Studie von Lane *et al.* (2003) unterstützt auch die These, daß die Dünenflächen im Nirgal Vallis durch eine junge und erhaltene Kraterpopulation, die der Neigung der Isochronen folgt, beeinflusst sind. Deswegen können die Unsicherheiten in der Kraterstatistik aufgrund von Auslöschungsprozessen als gering eingeschätzt werden und liegen sehr wahrscheinlich innerhalb der Fehlerabschätzung der obereren Modell-Altersbestimmungen (< 3 Millionen Jahre).

7.6 Diskussion

Die letzte Aktivitätsphase der Dünen könnte bei höheren Oberflächendrücken gewesen sein, möglicherweise verursacht durch eine höhere Achsenneigung des Mars (Fanale *et al.*, 1982). Die absoluten Modellalter stimmen mit Modellen der veränderlichen Achsenneigung von Ward (1992) und Laskar *et al.* (2002) überein, nach denen Achsenneigungen von mehr als 30° in den letzten 3 Millionen Jahren erreicht wurden. Die letzte Phase von mehr als 30° S - Achsenneigung vor etwa 400.000 Jahren korreliert sehr gut mit den besten Modellaltern von 300.000 Jahren für die letztmalige Aktivitätsphase der Dünen.

Unter heutigen Klimabedingungen haben die am einfachsten in Saltation zu versetzenden Partikelgrößen auf dem Mars einen Durchmesser von etwa $100 \mu\text{m}$ (Feinsand) (Greeley *et al.*,

1980). Diese Korngrößendurchmesser könnten möglicherweise auch durch unter heutigen Bedingungen auftretende starke Winde (*Greeley et al.*, 1980) mit Höchstgeschwindigkeiten von bis zu 28 m/s^{-1} , die auf in-situ an der Viking 1 Landestelle gemessen wurden (*Ryan et al.*, 1978), in Saltation versetzt werden (siehe auch Kapitel 2.4.6 und Abbildung 18). Die exakten Partikelgrößen von marsianischen Dünen ist unbekannt, aber die großen, dunklen Dünenfelder setzen sich wahrscheinlich aus Feinsand zusammen (*Edgett und Christensen*, 1994) und sind vielleicht auch unter heutigen Klimabedingungen aktiv (*Edgett und Malin*, 2000). Wenn die staubbedeckten Dünen im Nirgal Vallis aus größeren Korngrößen bestehen als die dunklen Dünen (s. Kapitel 2.4.6), ist ein höherer Oberflächendruck Voraussetzung für eine Dünenbewegung. Bei höheren Oberflächendrücken könnten Winde ausreichender Stärke erreicht werden, um größeren Partikel wie Mittel- oder Grobsand in Saltation zu versetzen.

7.7 Schlußfolgerungen

1. Die Kraterzählungen auf den Dünen im Nirgal Vallis für die Bestimmung der letzten Aktivitätsphase zeigen absolute Modell-Alter um die 300.000 Jahre für das beste Modellalter und weniger als 1,4 Millionen Jahre für das obere Grenzalter (*Reiss et al.*, 2004). Der Fehler der Messungen für diese jungen Alter beträgt einen Faktor 2 (*Hartmann und Neukum*, 2001). Diese Alter deuten auf eine sehr junge Aktivitätsphase der Dünen in dieser Region hin, die möglicherweise auf eine höhere Achsenneigung des Mars mit ansteigenden atmosphärischen Drücken zurückzuführen ist.

2. Die relativen Altersbeziehungen der dünenüberlagernden Schwemmkegel der Erosionsrinnen zeigen deutlich, daß die Erosionsrinnen jünger sind als die Dünen. Deswegen müssen die Erosionsrinnen nach der letzten Aktivitätsphase der Dünen gebildet worden sein und sind mindestens jünger als 3 Millionen Jahre, vielleicht sogar jünger als 300.000 Jahre. Die Bildung der Erosionsrinnen könnte begonnen und/oder sich fortgesetzt haben, als die klimatischen Bedingungen sich änderten (von höheren zu niedrigeren Drücken und Windgeschwindigkeiten) und die Dünenaktivität im Nirgal Vallis endete. Das genaue Alter der Erosionsrinnen im Nirgal Vallis ist noch immer unklar, aber die Altersbestimmungen der Dünen durch Kraterzählungen bestätigen die vermuteten jungen Alter der Erosionsrinnen, selbst in dieser für das Vorkommen von Erosionsrinnen auf dem Mars sehr niedrigen mittleren Breiten.

