

Teil III.

Ergebnisse und Ausblick

8. Chronostratigraphie und Chronologie des Galileischen Mondes Callisto

8.1. Übersicht

Die folgende Unterteilung der geologischen Geschichte von Callisto in **chronostratigraphische Systeme** bzw. in **chronologische Perioden** stützt sich auf **Einschlagsereignisse** (*impact events*), bei denen große, mithilfe der Einschlagskraterstatistik gut datierbare Multiringstrukturen und besonders auffallende Strahlenkrater entstanden. Vergleichbare Unterteilungen wurden auf Mond und Merkur mit ihrer wechsellvollen geologischen Geschichte vorgenommen (vergl. Abschnitt 7.3.3). Die Geologie von Callisto dagegen ist mehr oder weniger "einfach", und es dominieren fast ausschließlich Impakt- und Erosionsprozesse. Die Notwendigkeit einer Einteilung in zeitstratigraphische Systeme, die sich in geologischem Stil nur wenig voneinander unterscheiden, wird daher wie folgt begründet:

1. Bei großen Einschlagsereignissen werden umfangreiche Materialmengen umverteilt und bereits existierende Oberflächenformen teilweise oder vollständig überdeckt oder zerstört. Becken und Strahlenkrater stellen daher bedeutende stratigraphische Horizonte dar, auch auf einer von "einfacher" Geologie geprägten Oberfläche.
2. Die Bildabdeckung der Callisto-Oberfläche, insbesondere im Bereich regionaler Auflösung (200 m/pxl bis 500 m/pxl), besonders aber im hoch aufgelösten Bereich, ist nach wie vor unvollständig. Neue Missionen der NASA und ESA zum Jupiter, die derzeit aber für die Zeit nach 2010 lediglich in Planung sind, werden die Bilddatengrundlage deutlich erweitern. Es ist daher sinnvoll, bereits einen stratigraphischen Zeitrahmen zur Verfügung zu haben, in den die auf der Grundlage neuer, umfassender Bildabdeckungen gewonnenen Beobachtungen eingegliedert werden können. Ferner ist nicht auszuschließen, dass das hier vorgestellte stratigraphische Einteilungsschema nach Erhalt neuerer, besserer Bilddaten modifiziert oder auch grundlegend geändert werden muß.
3. Die Altersstellung der stratigraphisch jungen, frischen Krater mit ausgedehnten hellen Strahlensystemen ist von grundlegender Bedeutung in der Frage nach dem zeitlichen Ablauf von Erosionsprozessen. Wie auf photogeologischen Karten planetarer Oberflächen allgemein üblich, werden Impaktstrukturen auch auf Callisto in unterschiedliche Erosionsklassen eingeteilt (vergl. Abschnitt 7.3.2). Allerdings sind Angaben zum Zeitraum, in denen ein Krater bis auf gerade noch erkennbare Reste abgetragen wurde, aus folgenden Gründen nur mit hohen Ungenauigkeiten möglich:
 - a) Absolute Altersbestimmungen können, solange noch kein radiometrisch datierbares Oberflächenmaterial von Landemissionen vorliegt, nur mit Einschlagschronologie-

modellen durchgeführt werden, die große Unsicherheiten aufweisen (*Neukum, 1997; Neukum et al., 1998; Zahnle et al., 1998, 2003*).

- b) Viele der hellen Strahlenkrater auf Callisto wurden sowohl von Voyager als auch von Galileo SSI nur in verhältnismäßig geringer Auflösung (meist > 1 km/pxl) abgedeckt. Die maximale kumulative Häufigkeit kann daher nur nach dem in Abschnitt 7.4.8 beschriebenen Verfahren abgeschätzt werden. Daraus resultieren Modellalter, die verglichen mit den wahrscheinlichen Altern der Krater viel zu hoch liegen.
4. Die Änderung in der Morphologie großer Ringbecken mit der Zeit lässt Rückschlüsse auf rheologische Veränderungen in der Eiskruste zu und erlaubt damit auch Rückschlüsse auf die thermale Entwicklung des Satelliten.

Das Mindestalter großer Einschlagsbecken wird aus den Kraterhäufigkeiten (1) der kontinuierlichen Ejektadecken, (2) der Böden der Ringgräben oder -furchen (falls genügend hoch aufgelöst) und (3) in den annähernd kreisförmigen, in regionalem Maßstab überwiegend glatt erscheinenden, hellen zentralen Ebenen (*central bright plains*) ermittelt. In den meisten, stark abgetragenen, älteren Becken sind derartige Messungen nicht mehr durchführbar, weil die hellen zentralen Ebenen und die "Ringe" (Bergrücken oder Grabenstrukturen) weitgehend von jüngeren Ablagerungen überdeckt sind.

Bei Einschlagskratern wird das Alter auf dem Kraterboden und den kontinuierlichen Ejektadecken gemessen bzw. abgeschätzt. Altersbestimmungen auf diesen beiden Einheiten unterscheiden sich unter Umständen voneinander, da das Innere von Kratern nachträglich durch Hangrutsche an den Kraterrändern überprägt worden sein kann. Auf den Oberflächen der terrestrischen Planeten ist die Bildung von Impaktschmelzen (*impact melt*) unmittelbar nach dem Einschlag, meist in Form von *pools* auf dem Kraterboden, in den Terrassen oder an den äußeren Flanken des Kraterrandes, eine weitere signifikante, zur Datierung geeignete geologische Einheit in Kratern (z. B. *Wilhelms, 1987*, und Zitate darin). Derartige Einheiten sind aber bei den Eismonden nicht exakt nachzuweisen, obwohl in einigen Kratern glatte Bereiche auftreten, die auf einen derartigen Prozess hindeuten könnten.

Kartierung und Messung der Kraterhäufigkeiten wurden überwiegend in den Bilddaten der Galileo-SSI-Kamera durchgeführt, deren gesamte Bildabdeckung von Callisto in Bild 5.5 (Abschnitt 5.4.3) gezeigt ist. Als weiterer wichtiger Bilddatensatz dienen die Daten der Voyager-Kameras mit 2 - 3 km/pxl räumlicher Auflösung mit den durch die SSI-Kamera geschlossenen Lücken (ca. 0.7 - 6.4 km/pxl). Abbildung 8.1 stellt diese als *Regional Mapping 1 - 5 (RM-1 bis 5)* bezeichneten Kartier- und Messbereiche dar. Vorwiegend dienen sie zur weiteren Unterteilung (a) der Kraterebenen aufgrund von Albedounterschieden, (b) zur Lokalisierung vermutlicher kryovulkanischer Bildungen, sowie (c) zur detaillierten Kartierung abgetragener großer Einschlagsstrukturen (Palimpseste, Ringbecken) (*Wagner und Neukum, 1994b; Klemaszewski et al., 1998a; Wagner et al., 1998a, 2004*). Aus Platzgründen sind diese Karten und ihre Legenden in verkleinertem Maßstab lediglich in den paläogeologischen Abbildungen 9.3 bis 9.14 (Abschnitte 9.3.2 ff.) enthalten. Wichtige Typlokalitäten der einzelnen Einheiten sind in den folgenden Abschnitten aufgeführt.

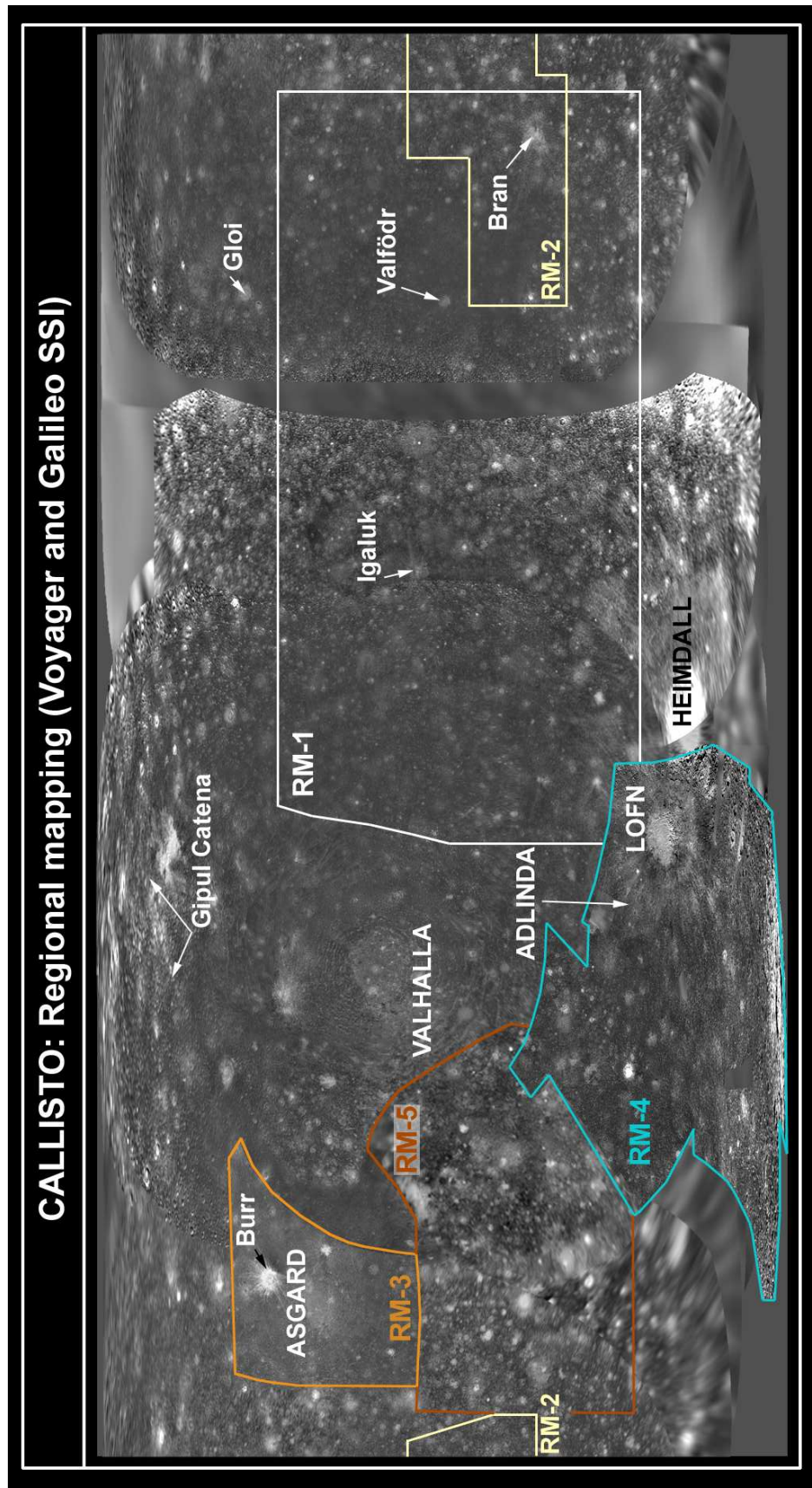


Abbildung 8.1.: Kartier- und Messbereiche in regionalem Bildmaßstab (ca. 0.7 - 4 km/pxl). Die Gebiete **RM-1** und **RM-2** basieren mit Ausnahme der durch SSI gefüllten Datenlücke (Zielgebiet G2CSVGRGAP01) ausschließlich aus Voyager-Bildclatn (vergl. *Wagner und Neukum*, 1994b). Die Regionen **RM-3** und **RM-4** entsprechen den SSI-Zielgebieten C3CSASGRNG01 (= RM-3) bzw. G8CSVGRGAP01, G8CSADLND01 und G8CSSPOLAR01 (= RM-4). Region **RM-5** umfasst zum Großteil das Zielgebiet G7CSGLOBAL01 im Voyager-Kontext; (zur Lage der SSI-Zielgebiete siehe Abb. 5.5 in Abschnitt 5.4.3).

Die geologische Geschichte von Callisto lässt sich vom Jüngeren zum Älteren in folgende chronostratigraphische Systeme bzw. chronologische Perioden unterteilen, deren Typlokalitäten und vorherrschenden geologischen Prozesse in den folgenden Abschnitten beschrieben werden:

1. **Burrian System** - benannt nach dem frischen Strahlenkrater Burr;
2. **Valhallian System** - benannt nach dem mit etwa 4000 km Durchmesser größten Einschlagsbecken Valhalla;
3. **Asgardian System** - benannt nach Asgard, dem zweitgrößten Einschlagsbecken auf Callisto;
4. **Pre-Asgardian System** - umfasst alle Einheiten, die älter als das Asgard-Becken sind.

Das Valhallische System kann durch das *Lofn-Becken* weiter unterteilt werden in eine (1) **Upper (Late) Valhallian Series (Epoch)** und in ein (2) **Lower (Early) Valhallian Series (Epoch)**.

Die Basishorizonte dieser Systeme sind durch Ablagerungen im Inneren dieser Einschlagsstrukturen sowie durch ihre Auswurfsmassen definiert. In Bild 5.3 (Abschnitt 5.4.2) sind die Namen und jeweilige geographische Lage dieser Becken und Krater angegeben.

In allen Abbildungen der Abschnitte 8.2 ff., die geologische Einheiten im Detail zeigen, werden in den meisten Fällen Kurzbezeichnungen nach den im methodischen Abschnitt 7.3.4 genannten Kriterien für chronostratigraphische Einheiten benutzt. Davon wurde nur in folgenden Fällen abgewichen: (a) einmal bei rein morphologischen Phänomenen, die vermutlich mehrere geologische Einheiten umfassen, und (b) bei Einheiten, deren Zuordnung nicht genau festzulegen ist, z. B. bei Gruppen von Sekundärkratern mit unbekanntem Ursprungskrater.

8.2. Burrianisches System

8.2.1. Strahlenkrater als stratigraphische Zeitmarken: Beispiel Erdmond

Beim Erdmond ist das oberste chronostratigraphische System, *Copernican*, durch morphologisch frische Krater mit hellen Strahlen charakterisiert (*Shoemaker und Hackman*, 1962; *Wilhelms*, 1987). Hauptkennzeichen des nach dem Krater Copernicus benannten Systems sind (a) Krater mit hellen, ausgedehnten Strahlensystemen, die bereits in kleinen Teleskopen gut erkennbar sind, (b) ein durchweg guter morphologischer Erhaltungszustand der Krater, (c) eine auffallend große Zahl von Felsblöcken auf Kraterrand und im Ejektamaterial (eine genügend hohe Bildauflösung vorausgesetzt), (d) verglichen mit älteren Kratern deutlich tiefere Kraterböden, und (e) eine geringe Anzahl überlagert kleinerer, jüngerer Krater (*Shoemaker und Hackman*, 1962; *Wilhelms*, 1987).

Krater des nächst-älteren *Eratosthenischen Systems* erscheinen ebenfalls morphologisch noch frisch, ihre Strahlen sind aber weniger ausgeprägt. Weder der Krater Copernicus noch Eratosthenes bilden die Basis der nach ihnen benannten Systeme, da nicht ausreichend gegenseitige

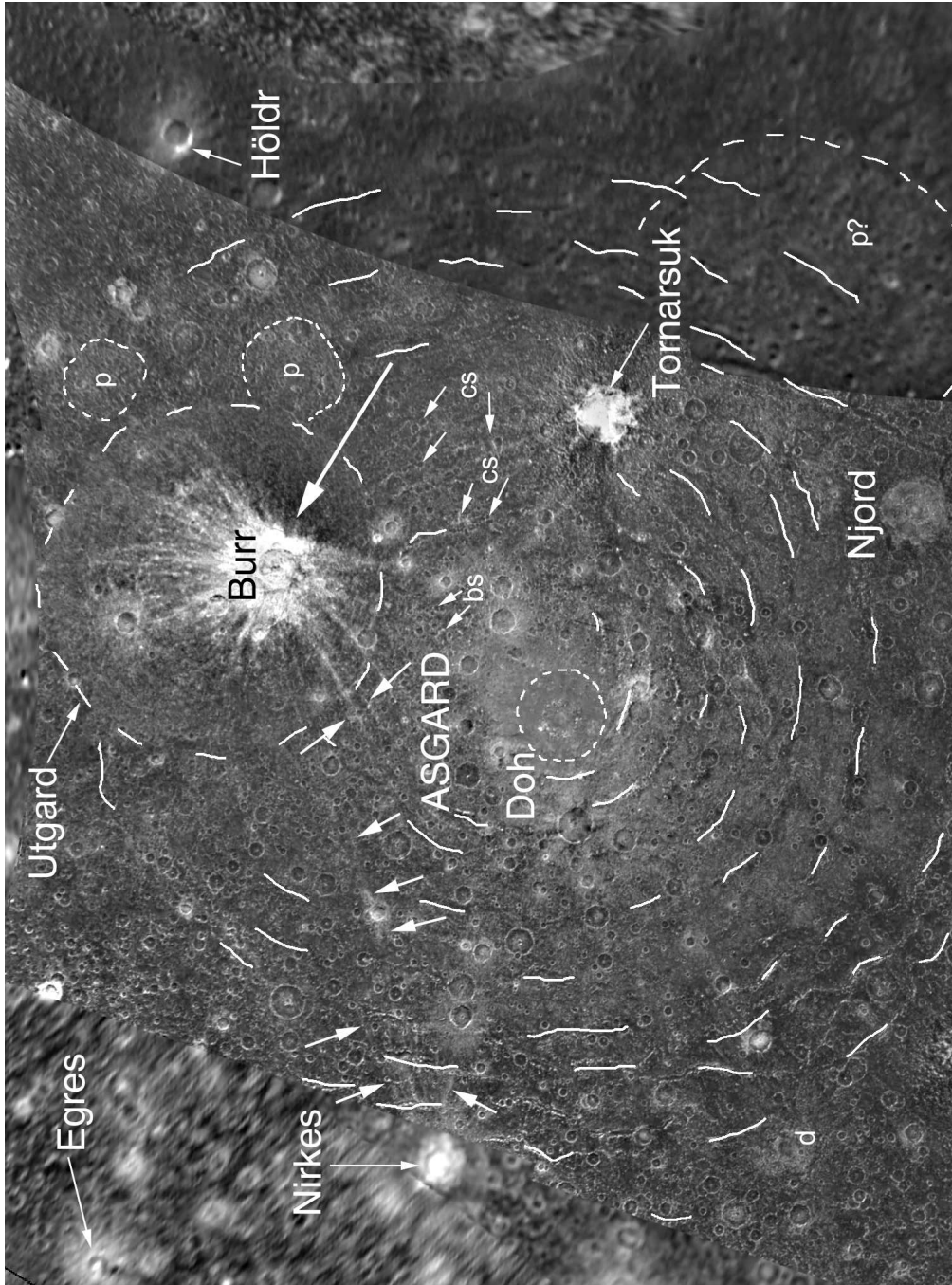


Abbildung 8.2.: Der Strahlenkrater Burr in der Region des Asgard-Beckens. Angegeben sind weitere helle, junge (benannte) Krater der Region und einige unbenannte Dom-Krater (**d**) und Palimpseste (**p**) in unterschiedlichen Erosionszuständen. Der lange Pfeil kennzeichnet die Richtung des schiefwinkligen Einschlags von Burr. Pfeile (ohne Beschriftung): Strahlensysteme; kleine Pfeile: vermutlich Sekundärkrater von Utgard, Doh oder Tornarsuk (**cs**) und Burr (**bs**). Mosaik aus vier SSI-Aufnahmen (Bildnummern: C3C0020 bis C3C0022) des Zielgebietes C3CSASGRNG01 in Voyager-2-Kontext, Bildauflösung ca. 1.1 km/pxl, Zentrum des Asgard-Beckens bei 32° N / 141° W. Weitere Erläuterungen siehe Text.

Überlagerungen mit anderen Einheiten vorhanden sind. Sie werden aber als Kratereinheiten betrachtet, die sich sehr früh in der jeweiligen Periode gebildet haben (vergl. *Wilhelms*, 1987).

Messungen der auf Copernicus überlagerten Krater ergaben nach dem lunaren Chronologiemodell Alter von 1.1 bis 1.5 Ga (*Neukum*, 1983; *Neukum und Ivanov*, 1994; *Wilhelms*, 1987)⁵³. Die untere Grenze der Copernicanischen Periode wird meist auf 1.1 Ga gesetzt (ebd.). Die untere Grenze der Eratosthenischen Periode ist durch radiometrische Alter von Apollo-12- und Apollo-15-Basalten festgelegt, die zwischen 3.16 Ga und 3.26 Ga schwanken (*Wilhelms*, 1987). Der Beginn dieser Periode wird in der Regel auf 3.2 Ga gesetzt, seit dieser Zeit ist die Einschlagsrate durch Asteroiden im Erde-Mond-System mehr oder weniger konstant (*Wilhelms*, 1987; *Neukum und Ivanov*, 1994; *Neukum et al.*, 2001a). Auf der Mondoberfläche sind helle Strahlensysteme also über mindestens 1 - 1.5 Ga Jahre stabile Phänomene, werden aber mit zunehmendem Alter schwächer und sind bei etwa 3 - 3.2 Ga alten Kratern zwar noch vorhanden, aber nicht mehr besonders auffällig. Als Gründe für dieses Verblässen mit der Zeit werden Sonneneinstrahlung, die Einwirkung kosmischer Strahlung, und das Bombardement mit Mikrometeoriten angeführt (z. B. *Shoemaker und Hackman*, 1962; *Melosh*, 1989).

Frische, stratigraphisch junge Krater der Erosionsklasse bzw. der lithostratigraphischen Gruppe c_3 mit hellen Strahlensystemen sind auf allen drei Galileischen Eismonden zu finden (*Passey und Shoemaker*, 1982; *Shoemaker et al.*, 1982; *McEwen*, 1986; *Greeley et al.*, 1998, 2000a,b). Sie überdecken alle anderen geologischen Einheiten und eignen sich daher als Zeitmarken zur chronostratigraphischen Unterteilung.

8.2.2. Typlokalität

Burr, ein 65 km großer, ausgeprägt heller Krater mit scharfem Rand und Strahlensystem, stellt einen geeigneten Basishorizont für das jüngste chronostratigraphische System bzw. die jüngste chronologische Periode in der geologischen Geschichte von Callisto dar. Der Krater liegt bei 42.5° N Breite und 134.5° W Länge. Die höchste verfügbare Bildauflösung dieses Kraters beträgt jedoch lediglich 1.1 km/pxl.

Burr liegt der älteren, einem Palimpsest ähnlichen Ringstruktur *Utgard* mit einem Durchmesser von etwa 600 km auf, die wiederum die Ringe des noch älteren Asgard-Multiringbeckens überdeckt, wie Bild 8.2 verdeutlicht. Weitere ältere Palimpseste (p) sind in Abb. 8.2 eingezeichnet. Im süd-östlichen Sektor Asgard's könnte sich eine weitere, einem Palimpsest ähnliche Ringstruktur (p?) befinden, der Größe nach vergleichbar der Utgard-Struktur.

In der Asgard-Region befinden sich neben Burr weitere helle, jüngere Krater: *Nirkes* (29.5° N / 163.5° W, 45 km Durchmesser), *Höldr* (44.2° N / 109° W, 48 km), *Egres* (42.5° N / 177° W, 35 km), und *Tornarsuk* (28.5° N / 128.5° W, 90 km). Die Ejekta dieser Krater sind ebenfalls hell, Strahlensysteme sind jedoch kaum ausgeprägt, außer bei Tornarsuk.

⁵³Apollo-Proben, die dem Auswurfmaterial des Kraters entstammen sollen, ergaben ein radiometrisches Alter von 800 Ma. Es ist aber nicht gesichert, ob es sich dabei wirklich um Copernicus-Ejekta handelt (*Wilhelms*, 1987).

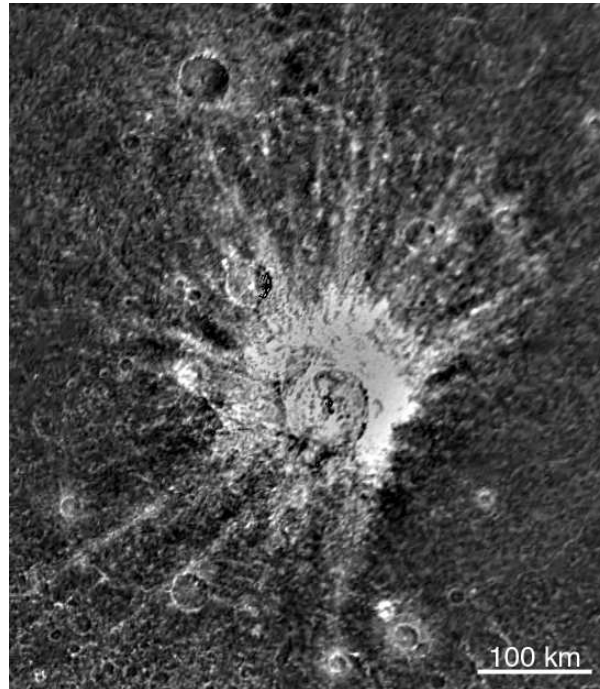


Abbildung 8.3.: Burr-Krater: Typlokalität des Burrianischen Systems. Vergrößerter Ausschnitt von Bild 8.2.

8.2.3. Geologie der Typlokalität

Die beiden Detailaufnahmen (Bild 8.3 und 8.4) zeigen Burr als auffallend hellen Krater mit scharfen Rändern, kontinuierlichen Ejekta und einem Strahlensystem, das sich mindestens bis zu einer Entfernung von etwa 400 km vom Kraterzentrum erstreckt. Die Verteilung der hellen Ejekta um Burr ist bilateral-symmetrisch entlang einer etwa NW-SE verlaufenden Achse. Helle Ejekta fehlen im süd-östlichen Sektor.

Durch Laborexperimente von Impakten mit unterschiedlichen Neigungswinkeln der auftreffenden Probekörper gegenüber der Oberfläche wurde demonstriert, dass Krater zu länglichen Formen tendieren, wenn Einschlagswinkel von $\approx 20^\circ$ unterschritten werden (*Gault und Wedekind, 1978*). Die Autoren fanden ferner eine Veränderung in der Verteilung der Ejekta um den Krater mit abnehmendem Impaktwinkel. Axialsymmetrie um das Kraterzentrum herrscht bei senkrechten Einschlägen bis herab zu einem Winkel von etwa 45° vor (ebd.). Bei Winkeln darunter geht die Axial- in eine Bilateralsymmetrie entlang der Impaktrichtung über. Bereits unterhalb von etwa 30° Einschlagswinkel treten so genannte "verbotene" Zonen auf, zunächst in der Richtung, aus der das Projektil kommt, bei weiter abnehmenden Einschlagswinkeln auch in Flugrichtung. In diesen Bereichen setzen sich keine Ejekta ab. Bei Winkeln unter 5° ist das Verteilungsmuster der Ejekta um den Krater streng bilateral-symmetrisch (*butterfly wing-like pattern*).

Der Pfeil in Bild 8.2 gibt die wahrscheinlichste Einschlagsrichtung aus südöstlicher Richtung an. Burr ist rund, d. h. der Einschlagswinkel lag nicht unter 20° , aber sicher unter 30° wegen des Auftretens einer "verbotenen Zone" ohne Ejekta (*Gault und Wedekind, 1978*).

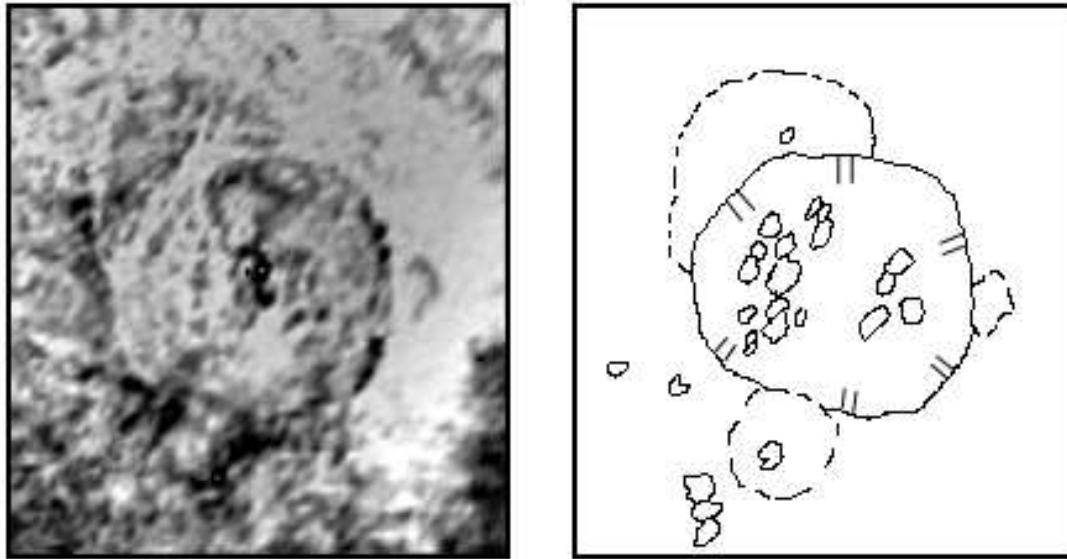


Abbildung 8.4.: Detailansicht von Burr mit geologischer Skizze (vergrößerter Ausschnitt von Bild 8.3). Gestrichelt: vor Burr existierende Krater; durchgezogene Linien: mutmaßliche Kraterketten auf dem Boden und außerhalb von Burr.

Auf dem Kraterboden befinden sich mehrere, wegen der zu geringen Auflösung nur undeutlich erkennbare, kraterähnliche Gebilde, die in Gruppen angeordnet sind (Bild 8.4). Die nahe liegendste Interpretation sind Sekundärkrater von einem nicht bekannten, noch jüngeren Krater in der Umgebung von Burr. Sie könnten aber auch von Burr selbst herrühren, wie an einem möglichen Beispiel in Abschnitt 8.2.7 näher erläutert wird.

Spektrale Analysen mit dem NIMS-Instrument auf Galileo ergaben für die hellen Strahlenkrater des Typs c_3 markante Wassereisabsorptionsbanden bei 1.5 und $2 \mu\text{m}$ (McCord *et al.*, 1998; Hibbitts *et al.*, 2000). Durch weitergehende spektrale Untersuchungen an Kratern auf Callisto wiesen Hibbitts *et al.* (2002) bei einigen, aber nicht allen dieser stratigraphisch jungen Krater das Vorhandensein einer CO_2 anzeigenden Absorptionsbande bei $4.26 \mu\text{m}$ nach. Die Autoren fanden die höchste Konzentration an CO_2 (a) im Inneren und an den Rändern der Krater, (b) in der Umgebung und (c) auf den Ejekta. Weiterhin konnten sie nachweisen, dass die größte CO_2 -Anreicherung mit dem Alter des jeweiligen Kraters korreliert ist: Je heller und weniger abgetragen, demzufolge je jünger der Krater ist, umso höher der CO_2 -Gehalt.

8.2.4. Typlokalitäten geologischer Einheiten des Burrianischen Systems in regionalem Maßstab

In regionalem Maßstab, d. h. bei Bildauflösung zwischen etwa 500 m/pxl und 6 km/pxl , sind weitere geologische Einheiten zu identifizieren, die andere Einheiten überlagern und daher relativ jung sind. Aufgrund der zu geringen Auflösung sind sie nicht durch überlagerte kleinere Krater genau zu datieren. In allen Fällen handelt es sich dabei um Impaktstrukturen.

Die lithostratigraphische Gruppe c_3 - helle, frische Krater mit Strahlensystem - ist mit dem durch den Krater Burr typisierten jüngsten System korreliert. Die Krater dieser Gruppe sind sicher jünger als das Valhalla-Becken, dem einige dieser Krater überlagert sind. Das Valhalla-Becken (V) ist damit für diese Krater ein "absoluter" unterer Horizont. Entsprechend werden alle Krater der Erosionsklasse c_3 aufgrund der nicht exakt lösbaren stratigraphischen Beziehung einer chronostratigraphischen Einheit **BVc** zugeordnet.

Weitere Beispiele solcher Krater zeigt Abb. 8.5 (a). Die Beispiele, der etwa 90 km große Krater *Igaluk* und drei weitere, kleinere Krater, stammen aus dem SSI-Zielgebiet G2CSVGRGAP01 mit 4.3 km/pxl räumlicher Auflösung. Anders als verglichen mit der Ganymed-Oberfläche sind die hellen Strahlen, Böden und Ränder hier wegen der generell dunkleren Callisto-Oberfläche weit weniger markant. Der in Abb. 8.5 (a) links unten gelegene Krater scheint auch dunkle Strahlen aufzuweisen, wie sie an Kratern auf Ganymed zu beobachten sind (*Conca*, 1981; *Schenk und McKinnon*, 1991; *Stephan et al.*, 2003). Allerdings ist nicht genau zu klären, ob sich hier wie bei Ganymed wirkliche dunkles Material auf der Callisto-Oberfläche abgesetzt hat. Der Eindruck dunkler Strahlen könnte auch durch nebeneinander abgelagerte helle Ejekta unterschiedlicher Mächtigkeit hervorgerufen werden.

Helle Dom-Krater oder Penepalimpsesten ähnliche Impaktstrukturen mit ausgeprägt hellen Böden oder Ejekta, die der lithostratigraphischen Gruppe d_3 zuzuordnen sind, treten selten auf. Ihre Anzahl liegt deutlich unter 10. Ein Beispiel aus dem Zielgebiet G8CSVGRGAP01 (980 m/pxl) aus den südlichen Breiten der Jupiter zugewandten Hemisphäre ist in Bild 8.5 (b) dargestellt. Ob die hellen Ejekta aufgrund eines schiefwinkligen Einschlags bilateral-symmetrisch verteilt sind oder ob sie im nord-westlichen Sektor bereits durch jüngerer Material überdeckt sind, ist mit den vorliegenden Daten nicht zu klären, da die nördliche Hälfte des Kraters nur durch Voyager-Daten niedrigster Qualität abgedeckt ist. Vorläufig wird eine chronostratigraphische Einheit **BVd** für die jüngsten Dom-Krater und Penepalimpseste aufgestellt, in die diese Krater eingeordnet werden.

Kraterketten sind ein auffälliges Phänomen auf der Callisto-Oberfläche, namentlich auf der in Richtung der Bahnbewegung gelegenen Hemisphäre (*McKinnon und Schenk*, 1995). Einige von ihnen überdecken Gräben des Valhalla-Beckens und sind somit jünger. Hierzu gehört die in Bild 8.5 (c) gezeigte, 340 km lange Kette *Gomul Catena*. Die Einzelkrater sind gekennzeichnet durch scharfe Ränder, im weiter westlich gelegenen Bereich der Kette sind Boden, Ränder und kontinuierliche Ejekta auffallend hell. Die Kette kann somit einer lithostratigraphischen Einheit ca_3 zugeordnet werden, die die am besten erhaltenen Ketten und somit jüngsten Ketten repräsentiert.

Eine Datierung auf mit 39 m/pxl hoch aufgelösten Daten des SSI-Zielgebiets C3CSCATENA01, deren Lage in Bild 8.5 (c) eingezeichnet ist, ergab Alter nach *Model I* von ca. 3.5 Ga in der nächsten Umgebung der Kette, vergleichbar dem abgeschätzten (aber vermutlich zu hohen Alter) von Burr. Zur näheren Betrachtung der Geologie von Gomul Catena und ihrer Kraterhäufigkeiten im hoch aufgelösten Bereich sei hier auf den späteren Abschnitt 8.4.8 verwiesen. Der relativ geringe Erosionszustand von Gomul Catena und die hellen Ejekta rechtfertigen die Aufstellung einer chronostratigraphischen Einheit **BVca** für die jüngsten (zumindest post-Valhallischen) Kraterketten.

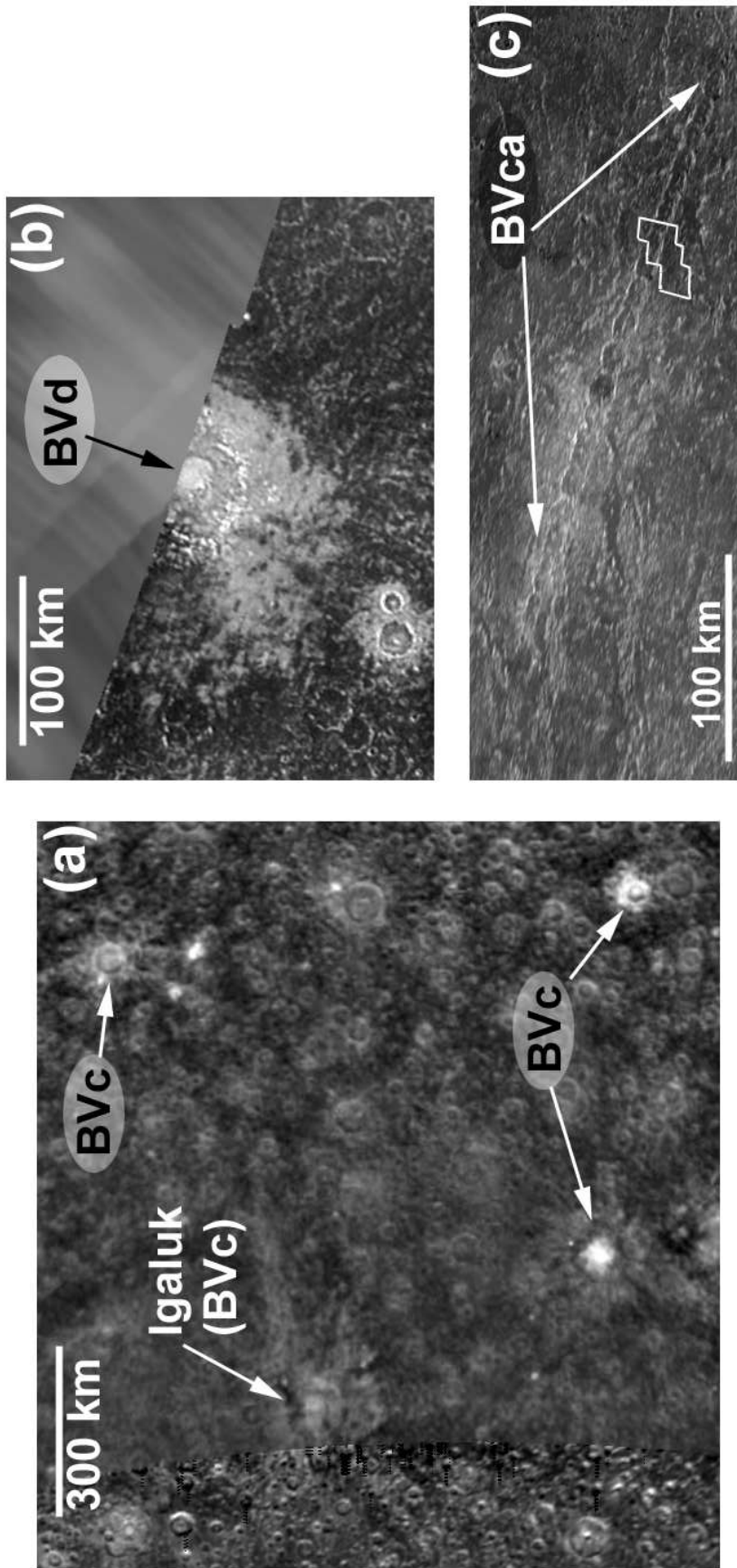


Abbildung 8.5.: Typlokalitäten geologischer Einheiten des Burrianischen Systems in regionalem Maßstab. (a) weitere helle (und dunkle) Strahlenkrater, SSI-Zielgebiet G2CSVGRGAP01, Bildzentrum etwa bei 3° N, 306° W; (b) heller Dom-Krater im SSI-Zielgebiet G8CSVGRGAP01 bei 2.3° S, 74.1° W; (c) Kraterkette *Gomal Catena* in Daten des SSI-Zielgebiets C9CSVALHAL01, unbeschrieben ist das Zielgebiet C3CSCATEANA01 mit hoher Auflösung (39 m/pxl, siehe hierzu näher Abschnitt 8.4.8), Bildzentrum etwa bei 36° N, 48° W.

Geol. Einheit	N_{cum} ($D \geq 1$ km)	Model I [Ga]	Model IIa [Ga]	Model IIb [Ga]
<i>Burr:</i> <i>buf + bue</i>	$< 4.86 \cdot 10^{-4}$	< 3.51	< 0.25 (1.14, 0.05)	< 0.67 (1.7, 0.23)
$N_{Burr} = 1:$	$9.94 \cdot 10^{-5}$	1.20	[0.05 (0.26, 0.01)]	[0.14 (0.42, 0.05)]

Tabelle 8.1.: Abgeschätzte kumulative Häufigkeiten und Modellalter des Kraters Burr. Einheiten: Kraterboden (*buf*) und kontinuierliche Ejekta (*bue*). Angegeben ist ferner das durchschnittliche Bildungsalter für mindestens einen Krater der Größe von Burr ($N_{Burr} = 1$) für die gesamte Callisto-Oberfläche nach *Model I*. In eckigen Klammern sind die nach der diesem Alter korrespondierenden kumulativen Häufigkeit rückgerechneten Alter nach *Modell IIa/b* angegeben.

8.2.5. Beginn und Dauer der Burrianischen Periode

Der Einschlag, bei dem der Strahlenkrater Burr entstand, kann nur mithilfe der in Abschnitt 7.4.8 beschriebenen Abschätzung von Kraterhäufigkeiten datiert werden. Bei einer gegebenen Auflösung von 1.1 km/pxl sind weder auf dem Kraterboden noch auf den kontinuierlichen Ejekta Messungen von Kraterhäufigkeiten zur genauen Datierung von Burr durchführbar. Die kumulativen Häufigkeiten und Modellalter wurden für Kraterboden und kontinuierliche Ejekta abgeschätzt. Sie sind in Tabelle 8.1 aufgeführt.

Da die verfügbare Bildauflösung mit nur 1.1 km/pxl relativ gering ist, sind die abgeschätzten Alterswerte - in *Model I* von **3.51 Ga** - vermutlich viel zu hoch. Legt man als Richtwert die Alter der hellen Krater des lunaren Copernicanischen Systems zugrunde und nimmt man an, dass helle Strahlen auf Eisoberflächen zumindest ähnlich stabile Erscheinungen wie auf silikatischen Oberflächen sind, dann könnte das Alter von Burr eher in der Größenordnung von 1 - 2 Ga liegen, wie von *Passey und Shoemaker* (1982) vermutet. Aus den auf Boden und Ejekta abgeschätzten Häufigkeiten folgt im kometaeren *Modell IIa/b* ein Alter von mehreren 100 Millionen Jahren als Alterobergrenze für Burr.

Aus der Chronologie *Model I* folgt, dass sich auf der gesamten Callisto-Oberfläche ($7.256 \cdot 10^7$ km²) ein Krater Burr vergleichbaren Durchmessers im Mittel einmal alle 1.2 Ga bildet. Dieser Zusammenhang ist in Bild 8.6 dargestellt. In Tabelle 8.1 ist für diesen Fall ($N_{Burr} = 1$) die entsprechende kumulative Häufigkeit mit den beiden daraus rückgerechneten Altern in *Modell IIa/b* (in Klammern) angegeben. Der in Bild 8.6 angegebene Grenzdurchmesser von 120 km für den Übergang vom Produktionsverteilungs-Polynom 11. Grades zu einer mittleren Steigung von -2 bei großen Kratern und Becken > 120 km resultiert aus der Verschiebung der lunaren Verteilungsfunktion in $\log-D$ zu kleineren Kraterdurchmessern bei Callisto um einen Faktor 2.4 (vergl. hierzu Gleichungen 7.26 und 7.27 in Abschnitt 7.4.4.1 und Abschnitt 7.4.4.2).

Nimmt man die durchschnittliche Bildungszeit von 1.2 Ga als mögliche untere Grenze des Alters für Burr an, wäre der Beginn der jüngsten chronologischen Periode auf Callisto in *Model I*

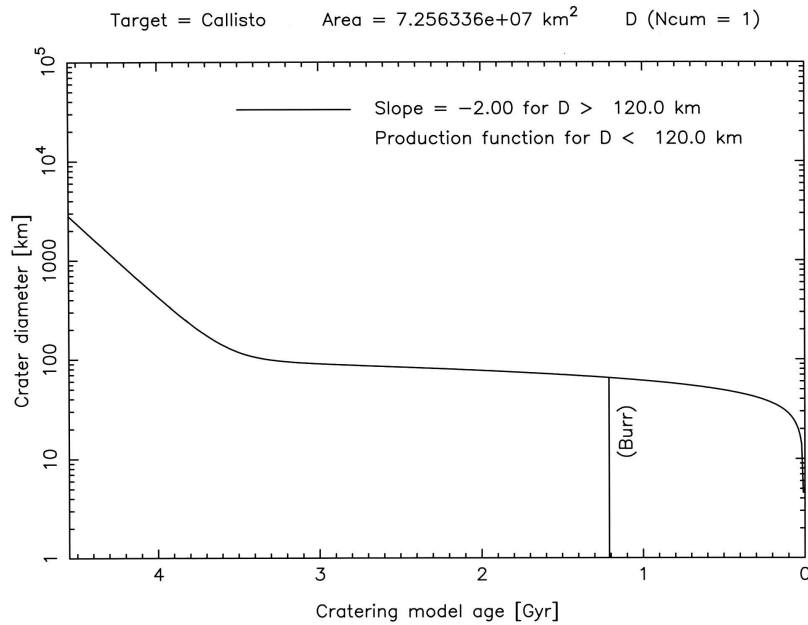


Abbildung 8.6.: Kratergröße als Funktion des Alters für die gesamte Callisto-Oberfläche. Das Diagramm zeigt, wie oft im Mittel ein Krater gegebener Größe D - in diesem Fall Burr mit etwa 60 km Durchmesser - auf der gesamten Oberfläche im Mittel mindestens einmal entsteht (d. h. $N_{cum}(D) = 1$), dargestellt für das Chronologie-Modell nach *Neukum* (1997) und *Neukum et al.* (1998).

dem Beginn der lunaren Copernicanischen Periode (1.5 Ga (*Neukum*, 1983)) vergleichbar. In *Model IIa/b* könnte die jüngste Periode dann lediglich die letzten 50 bis 140 Millionen Jahre umfassen (siehe Tabelle 8.1). Da die konstante Einschlagsrate (und demzufolge die kumulativen Häufigkeiten) in diesem Modell aber über der seit 3 Ga konstanten Einschlagsrate nach *Model I* liegt (vergl. Abb. 7.8, Abschnitt 7.4.5.4), würde daraus ein noch jüngeres Alter von nur wenigen Millionen bis Zehnermillionen Jahre für die Strahlenkrater resultieren.

Burr typisiert als auffälligster und hellster der Callisto-Strahlenkrater zwar das oberste stratigraphische System, stellt aber vermutlich nicht den eigentlichen Basishorizont dar. Es gibt zu wenig Überlappungen mit anderen Einheiten, und die Bildauflösung reicht nicht aus, um Burr oder andere Strahlenkrater genau zu datieren. Ein ähnliches Problem existiert, wie bereits erwähnt, beim Copernicanischen System auf dem Erdmond (vergl. *Wilhelms*, 1987).

Der Beginn dieser jüngsten Periode liegt in *Model I* vermutlich vor ≈ 1 Ga (ableitbar aus der durchschnittlichen Entstehungszeit für einen Krater der Größe von Burr), und höchstens vor $\approx 3.5 - 4$ Ga. Die hellen Krater sind damit analog zur Impaktgeschichte der terrestrischen Planeten sicher nach den großen Becken in einer Zeit konstanter Einschlagsrate entstanden.

Ein Blick auf die beiden inneren Eismonde Ganymed und Europa, auf Stratigraphie und Alter ihrer Strahlenkrater im folgenden Abschnitt 8.2.6 hilft weiter, die mögliche Altersspanne dieser Krater und die Zeitdauer der jüngsten Periode der Callisto-Geschichte genauer festzulegen. In Abschnitt 8.2.7 werden am Beispiel eines Strahlenkraters aus dem Saturnsystem Probleme der Datierung dieser Krater, selbst bei Verfügbarkeit räumlich hoch aufgelöster Daten, diskutiert.

8.2.6. Strahlenkrater auf Ganymed und Europa und ihre Datierung

Auf den beiden inneren Galileischen Eismonden sind helle Strahlenkrater vorhanden, davon auf Ganymed in relativ großer Zahl (*Passey und Shoemaker, 1982*). Im Vergleich zu Callisto sind sie hier auffälliger, da viele von ihnen in den hellen Gebieten von Ganymed liegen, das den größten Teil der Oberfläche einnimmt (ebd.) (vergl. hierzu Bild 7.1 in Abschnitt 7.3.2). Einige dieser Krater wurden von der SSI-Kamera in hoher Auflösung (< 200 m/pxl) aufgenommen. Von den meisten der teilweise sehr großen Krater (Durchmesser um 100 km) liegen dagegen nur niedriger aufgelöste Aufnahmen (0.9 - 4 km/pxl) vor, die sich nicht zur genauen Datierung eignen.

Die Anzahl von Kratern auf Europa ist wegen der im Vergleich zu Ganymed und Callisto jüngeren Oberfläche deutlich niedriger (*Lucchitta und Soderblom, 1982; Turtle et al., 1999*). Auf Europa sind keine Impaktstrukturen mit Durchmessern über 45 km anzutreffen. Multiring-Strukturen treten in nur zwei Kratern bereits bei niedrigen Durchmessern (bei 40 km) auf (*Turtle et al., 1999*).

8.2.6.1. Strahlenkrater auf Ganymed

Bild 8.7 zeigt die Strahlenkrater Achelous, Osiris, und Melkart auf Ganymed. **Osiris**, bei 38° Süd und 166° West gelegen, wurde von *Wilhelms (1997)* in die Gruppe c_3 eingestuft. Sein Strahlensystem prägt einen Großteil der südlichen Breiten der Jupiter abgewandten Ganymed-Hemisphäre. Osiris ist mit einem Durchmesser von 143 km ein vergleichsweise großer Krater. Die Zentralmulde mit einer Aufwölbung im Innern (*dome*) weist einen Durchmesser von etwa 45 km auf. Die hellen Strahlen und Sekundärkrater erstrecken sich noch bis in ca. 2000 km Entfernung, meist über helles Gebiet, und sind daher gut erkennbar. Sekundärkrater-Gruppen von Osiris sind auf höher aufgelösten SSI-Aufnahmen noch in großer Entfernung deutlich zu identifizieren. Die hellen Ejekta scheinen bilateral-symmetrisch entlang einer etwa NE-SW verlaufenden Achse angeordnet zu sein. Das Osirisprojektile könnte somit aus nord-östlicher Richtung gekommen sein und mit einem Winkel zwischen 20 und max. 45° auf der Oberfläche aufgeschlagen sein, wie der noch deutlich kreisförmige Krater belegt (vergl. *Gault und Wedekind, 1978*). NIMS-Spektren Osirisbeigen markante Absorptionsbanden von Wassereis, dies allerdings auch zusätzlich bedingt durch die Tatsache, dass Osiris bereits im Bereich der südlichen Polkappe von Ganymed liegt (*Stephan et al., 2003; Stephan, 2006*).

Helle Strahlensysteme kennzeichnen den bei 62° Nord und 12° West gelegenen Krater **Achelous** (Bild 8.7, oben) ebenfalls als typischen c_3 -Krater in den älteren Voyager-1-Daten (*McGill et al., 1997*). Die Strahlen dieses 34 km großen Kraters kommen auf den mit 178 m/pxl hoch aufgelösten SSI-Daten nicht deutlich zum Vorschein, da die Sonne zum Aufnahmezeitpunkt während der siebten Galileo-Umkreisung (G7) niedrig über der Oberfläche stand (Bild 8.7).

Die kontinuierlichen Ejekta Achelous' sind morphologisch zweigeteilt: Der Kraterrand ist von einem etwa einen Kraterradius breiten Ring umgeben, der durch ein Podest oder Sockel (*pedestal*) von den übrigen kontinuierlichen Ejekta abgegrenzt ist (*Moore et al., 1998*). Derartige *Sockelkrater* (*pedestal craters*) wurden außer bei Ganymed-Kratern auch bei Mars-Kratern beobachtet und entstehen bevorzugt bei Einschlägen in eishaltiges Target-Material (vergl. *Horner und*

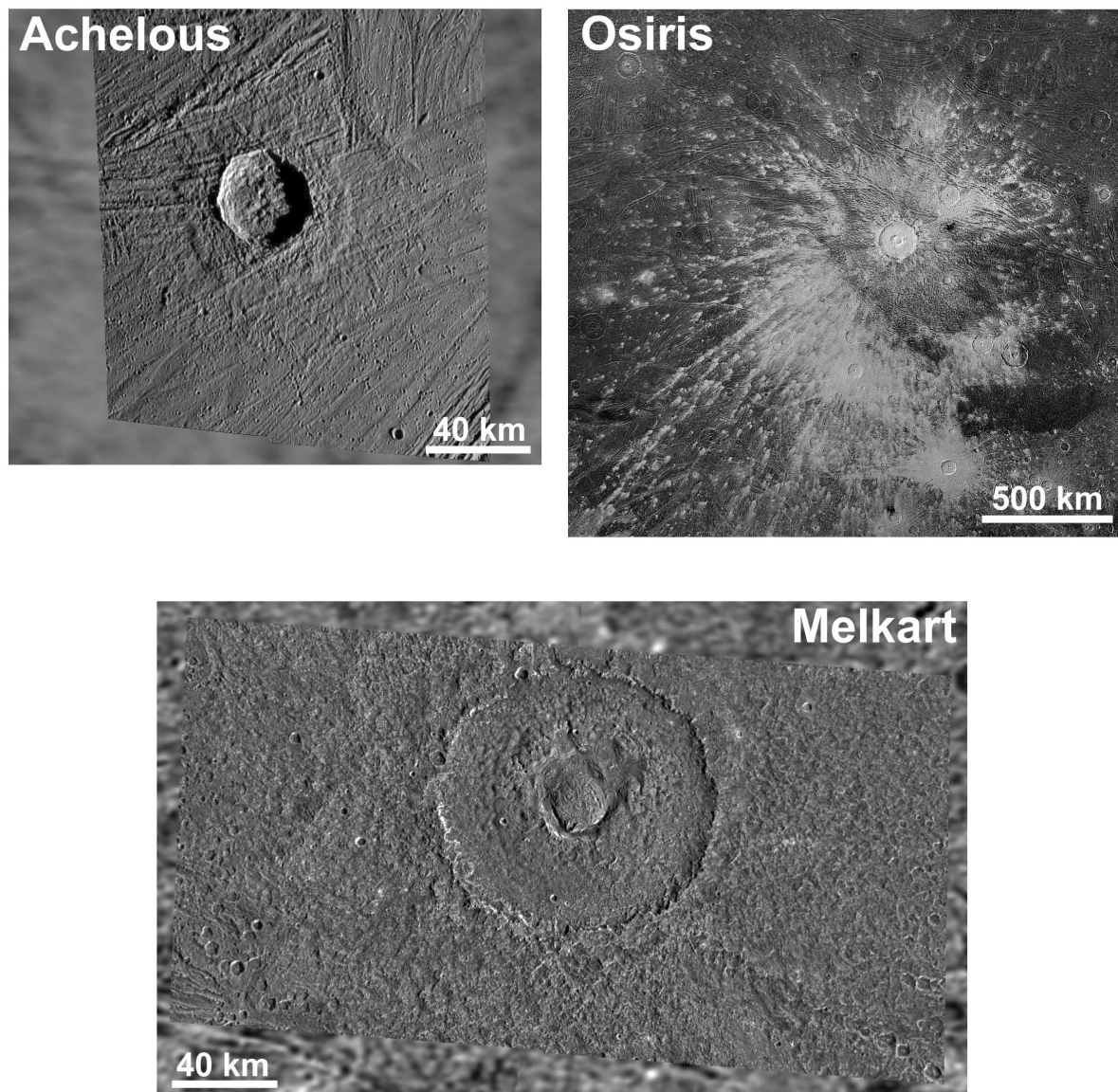


Abbildung 8.7.: Stratigraphisch junge Krater auf Ganymed: Achelous, Osiris und Melkart. *Achelous*: SSI-Daten (Zielgebiet G7GSACHELS01, Bildnummer G7G0020, 178 m/pxl, 62° Nord, 12° West); *Osiris* und Umgebung: Mosaik aus Voyager-2-Daten (900 m/pxl, 38° Süd, 166° West); *Melkart* und Umgebung: SSI-Daten (Zielgebiet G8GSMELKRT01, Bildnummern G8G0008, G8G0009, 180 m/pxl, 10° Süd, 186° West) in Voyager-2-Kontext. Achelous und Osiris in winkeltreuer Lambert'scher Projektion, Melkart in Mercator, Norden zeigt in allen drei Bildern nach oben. Achelous und Melkart sind in gleichem Größenverhältnis dargestellt.

Geol. Einheit	N_{cum} ($D \geq 1$ km)	Model I [Ga]	Model IIa [Ga]	Model IIb [Ga]
<u>Osiris:</u> <i>osf + ose</i>	$< 6.54 \cdot 10^{-4}$	< 3.3	< 0.096 (0.46, 0.02)	< 0.31 (0.87, 0.11)
<u>Achelous:</u> <i>acf + ace</i>	$< 6.65 \cdot 10^{-5}$	< 0.41	< 0.01 (0.050, 0.002)	< 0.03 (0.1, 0.01)
<u>Gula:</u> <i>guf + gue</i>	$2.35 \pm 0.72 \cdot 10^{-3}$	3.73 ± 0.06	0.33 (1.4, 0.07)	1.0 (2.4, 0.4)
<u>Kittu:</u> <i>kif + kie</i>	$< 1.19 \cdot 10^{-4}$	< 0.73	< 0.02 (0.09, 0.004)	< 0.06 (0.17, 0.02)
<u>Melkart:</u> <i>mee</i>	$3.07 \pm 0.64 \cdot 10^{-3}$	3.78 ± 0.035	0.43 (1.8, 0.09)	1.29 (2.9, 0.48)

Tabelle 8.2.: Kumulative Häufigkeiten (jeweils für $N_{cum}(D \geq 1$ km)) und Modellalter ausgewählter Ganymedkrater. Osiris (abgeschätztes Alter): Boden (*osf*) und kont. Ejekta (*ose*); Achelous und Gula: Boden (*acf*, *guf*) und kont. Ejekta (*ace*, *gue*); Kittu (abgeschätztes Alter): Boden (*kif*) und kont. Ejekta (*kie*); Melkart: kont. Ejekta (*mee*); Daten aus *Wagner et al.* (1999) und *Stephan et al.* (2003), für *Model IIa/b* neu bestimmt.

Greeley, 1982). In einer Entfernung von etwa einem Kraterdurchmesser vom äußeren Kraterrand enden die kontinuierlichen Ejekta, außerhalb befindet sich eine Zone mit Sekundärkratern.

Melkart (Abb. 8.7) mit einem Durchmesser von 104 km, gelegen bei 10° Süd und 186° West, weist ebenfalls ein Strahlensystem auf und wurde von *Guest et al.* (1988) in die gleiche Gruppe c_3 wie Osiris eingruppiert. Die Strahlen, die sich über dunkle und helle Einheiten erstrecken, sind aber deutlich schwächer als bei Osiris. Melkart wurde durch zwei Aufnahmen der SSI-Kamera in hoher Auflösung (Orbit G8, 145 m/pxl) abgedeckt. In den Galileo-NIMS-Daten deutet sich bei Melkart im Vergleich beispielsweise zu Osiris eine stärkere Vermischung von Wassereis mit Nicht-Eismaterial und damit ein höheres Alter an (*Stephan et al.*, 2003; *Stephan*, 2006).

Weitere teilweise sehr große Strahlenkrater wurden in noch geringerer Auflösung von der SSI-Kamera aufgenommen. Ihre abgeschätzten (maximalen) Alter von 3.5 Ga und mehr (*Model I*) liegen vermutlich viel zu hoch (vergl. *Stephan et al.*, 2003). Dagegen konnte der kleinere Strahlenkrater Achelous (35 km) durch Einschlagskraterstatistik datiert werden (*Wagner et al.*, 1999). Auf den hoch aufgelösten SSI-Daten (178 m/pxl) sind auf dem Kraterboden (*acf*) und in den Ejekta (*ace*) des Kraters Achelous keine kleineren Krater auffindbar. Die Abschätzung des Modellalters ergaben für *Model I* ein Alter von maximal 410 Ma, in den beiden Varianten des Kometenmodells liegt das Alter bei nur einigen 10 Ma (Tabelle 8.2).

Messungen in den Ejekta (*gue*) und auf dem Boden (*guf*) des Achelous nördlich benachbarten Kraters Gula (in Abb. 8.7 nicht gezeigt), der keine Kraterstrahlen aufweist und dem Typ c_2 zuzuordnen ist, ergaben ein *Model-I*-Alter von 3.73 Ga bzw. von wenigen 100 Ma bis zu 1 Ga in den beiden Varianten des Kometenmodells (vergl. Tabelle 8.2). Es ist nicht auszuschließen, dass ein großer Teil der auf Gula gemessenen kleinen Krater Sekundärkrater des benachbarten jüngeren Achelous sind, Gula somit in Wirklichkeit jünger ist.

Das Modellalter von Achelous zeigt, dass die Strahlenkrater auf den Jupiter-Eismonden vergleichsweise junge Bildungen in der Größenordnung von < 1 Ga bzw. < 100 Ma in den beiden Chronologiemodellen sind. Einen weiteren Hinweis auf jüngere Alter für Strahlenkrater erhält man durch die Altersabschätzung des 17 km großen dunklen Strahlenkraters **Kittu** (SSI-Zielgebiet G7GSKITTU_01, 150 m/pxl, 0.5° Nord, 334° West). Das auf Boden und Ejekta (*kif* und *kie*) abgeschätzte Alter liegt in *Model I* ebenfalls unter 1 Ga, in *Model IIa/b* dagegen bei nur wenigen 10 Ma (Tabelle 8.2) (*Stephan et al.*, 2003).

Osiris wurde von Voyager-2 mit ca. 900 Meter pro Bildpunkt abgebildet. Bei dieser Auflösung sind kleinere Krater auf dem Boden (*osf*) oder den kontinuierlichen Ejekta (*ose*) nicht zu erkennen. Das Krateralter kann daher nur abgeschätzt werden. Die daraus resultierenden Modellalter sind in nachfolgender Tabelle 8.2 aufgelistet. Osiris entspricht mit einem maximalen *Model-I*-Alter von maximal ≈ 3.3 Ga etwa einem lunaren spät-Imbrisch/Eratosthenischen Krater, der nach den großen Becken bei bereits weitgehend konstanter Einschlagsrate entstand. Im Vergleich mit dem Alter lunarer Strahlenkrater dürfte das wahre Alter von Osiris - annähernd gleiche Stabilität heller Strahlen auf beiden Körpern vorausgesetzt - allerdings niedriger sein und trotz der Größe dieses Kraters näher bei 1 - 2 Ga oder darunter liegen.

Auf den kontinuierlichen Ejekta und auf dem Boden des Kraters Melkart konnte dagegen die Häufigkeit der kleineren überlagerten Krater gemessen werden. Das *Model-I*-Alter dieses Kraters liegt mit 3.78 Ga (Ejekta, *mee*) in derselben Größenordnung wie das Alter des Gilgamesh-Beckens, dem mit 3.8 Ga zeitlichen Fixpunkt von *Model I* (*Stephan et al.*, 2003). Wegen des deutlich schwächeren Strahlensystems von Melkart im Vergleich zu Osiris sowie aus der stärkeren Vermischung von Eis- und Nicht-Eismaterial bei Melkart (vergl. *Stephan*, 2006) ist zu schließen, dass zwischen der Entstehung von Kratern des Melkart-Typs und solchen des Osiris-Typs wahrscheinlich eine erhebliche Zeitspanne verging, vermutlich 1 Ga oder mehr, zumindest bei Annahme einer mond-ähnlichen Einschlagschronologie.

Die jüngsten, durch Strahlenkrater definierten stratigraphischen Systeme bzw. Perioden könnten auf beiden Satelliten daher wie beim Erdmond weiter unterteilt werden: Die eigentlichen Strahlenkrater vom Osiris- bzw. Burr-Typ sollten in eine jüngere Periode, Strahlenkrater vom Melkart-Typ in eine ältere Periode gestellt werden. Die jüngste Periode wäre folglich durch die Stabilität heller Strahlen bis in die Gegenwart, analog zur lunaren Copernicanischen Periode, charakterisiert.

Derzeit ist jedoch noch unbekannt, wie lange Strahlen auf Eisoberflächen erhalten bleiben, und ob es mögliche Unterschiede im zeitlichen Ablauf der Erosion von Kraterstrahlen auch zwischen Eissatelliten wie Ganymed und Callisto gibt (*Johnson et al.*, 1983). Die generell dunkleren Strahlenkrater auf Callisto im Vergleich zu Ganymed sind nach Ansicht dieser Autoren mehr durch Unterschiede im Gehalt dunkler Materialien als durch unterschiedliche Erosionsraten auf beiden Monden bedingt (ebd.). Dagegen sehen *Moore et al.* (1999) eine mit der Zeit schneller fortschreitende Abtragung von Geländeformen auf Callisto verglichen mit Ganymed, bedingt durch die Anwesenheit des die Sublimationsverwitterung beschleunigenden Kohlendioxids. Dies könnte zur Folge haben, dass die Strahlen eines Kraters vom Melkart-Typ auf Callisto schneller verschwinden würden als auf Ganymed.

Nach dem Kometen-Chronologiemodell (*Model Ia/Iib*) sind Strahlen bei Kratern wie Melkart bereits nach ca. 500 Millionen Jahren deutlich schwächer als bei Mond-Strahlenkratern und damit weitaus kurzlebiger als auf silikatischen Oberflächen. Zur Klärung dieser Fragen sind weitere Bilddaten hoher Auflösung und spektrale Daten einer zukünftigen Mission notwendig. Probleme der absoluten Datierung werden sich endgültig erst mit Landemissionen und Methoden radiometrischer Altersbestimmung von Oberflächenmaterial *in situ* lösen lassen.

8.2.6.2. Strahlenkrater auf Europa

Das im Vergleich zu Ganymed oder Callisto bedeutend niedrigere Oberflächenalter von Europa folgt aus der geringeren Anzahl an Einschlagskratern und aus dem Fehlen großer Multiringbecken mit Durchmessern über 100 km (*Lucchitta und Soderblom*, 1982). In *Model I* liegt das durchschnittliche Alter der Oberfläche etwa bei ≈ 1 Ga (vergl. *Neukum et al.*, 1998 und *Neukum et al.*, 1999), im Kometenmodell (*Modell Ia/b*) dagegen bei ≈ 10 Ma bzw. bei ≈ 70 Ma (*Zahnle et al.*, 1998 bzw. *Zahnle et al.*, 2003).

Von der Europa-Oberfläche sind keine Krater mit Durchmessern über 50 km bekannt (*Turtle et al.*, 1999). *Moore et al.* (1998) ordnen die Europa-Krater folgenden zwei Kategorien zu: (1) den so genannten "klassischen" Kratern, die etwa lunaren Kratern gleicher Größe ähneln, aber flacher sind, und (2) den von *Lucchitta und Soderblom* (1982) als *brown spots* bezeichneten, sehr flachen Strukturen, die kaum nennenswerte Topographie aufweisen und den Palimpsesten auf Ganymed und Callisto vergleichbar sind.

Bild 8.8 zeigt Beispiele für drei der größeren Einschlagskrater auf Europa, . **Cilix**, bei 2° Süd und 180° West gelegen, wurde in den Voyager-Daten als Krater eingestuft (vergl. *Smith et al.*, 1979b). Der 18 km große Krater (Bild 8.8) ähnelt lunaren Kratern, weist (a) einen scharfen Kraterrand auf, der sich etwa 300 m über die Umgebung erhebt, (b) einen ebenfalls etwa 300 m hohen Zentralbergkomplex, (c) Terrassen, und (d) einen hellen, relativ flachen Boden (*Moore et al.*, 2001). Der Krater ist von dunklen Auswurfsmassen, teilweise in Form von Strahlen, umgeben. Seine frische Morphologie charakterisiert ihn als typischen Vertreter der Gruppe c_3 .

Pwyll (26° Süd, 271° West) konnte in den SSI-Daten (Vorbeiflug E4) eindeutig als Krater identifiziert werden. Ein dunkler, etwa 50 km großer kreisförmiger Fleck (Bild 8.8) ist von einem hellen Strahlensystem umgeben, das sich bis in eine Entfernung von mehr als 1000 km um die Einschlagsstelle erstreckt und zumindest bei dieser Bildauflösung alle anderen Einheiten überdeckt (*Moore et al.*, 1998). Pwyll gehört damit ebenso wie Cilix der Gruppe c_3 an. Durch ein digitales Geländemodell des Kraters ließ sich nachweisen, dass der Kraterboden in etwa auf gleicher Höhe mit der Kraterumgebung liegt und die größten Höhenunterschiede von ca. 600 bis 800 m am Kraterrand und in einem Zentralbergkomplex auftreten (ebd.). Pwyll, anders als Cilix, ist somit ein ausgesprochen flacher Krater, trotz der "klassischen" Kraterform.

Tyre (34° Nord, 146° West) gehört nicht der klassischen Form an. Tyre und eine weitere Impaktstruktur, *Callanish* (16° Süd, 334° West), erscheinen in niedrigerer Auflösung (Voyager-Daten) als dunkle, braune Flecken und ähneln bei höherer Auflösung Palimpsesten, allerdings bei deutlich kleineren Durchmessern (*Lucchitta und Soderblom*, 1982; *Moore et al.*, 1998, 2001). Tyre

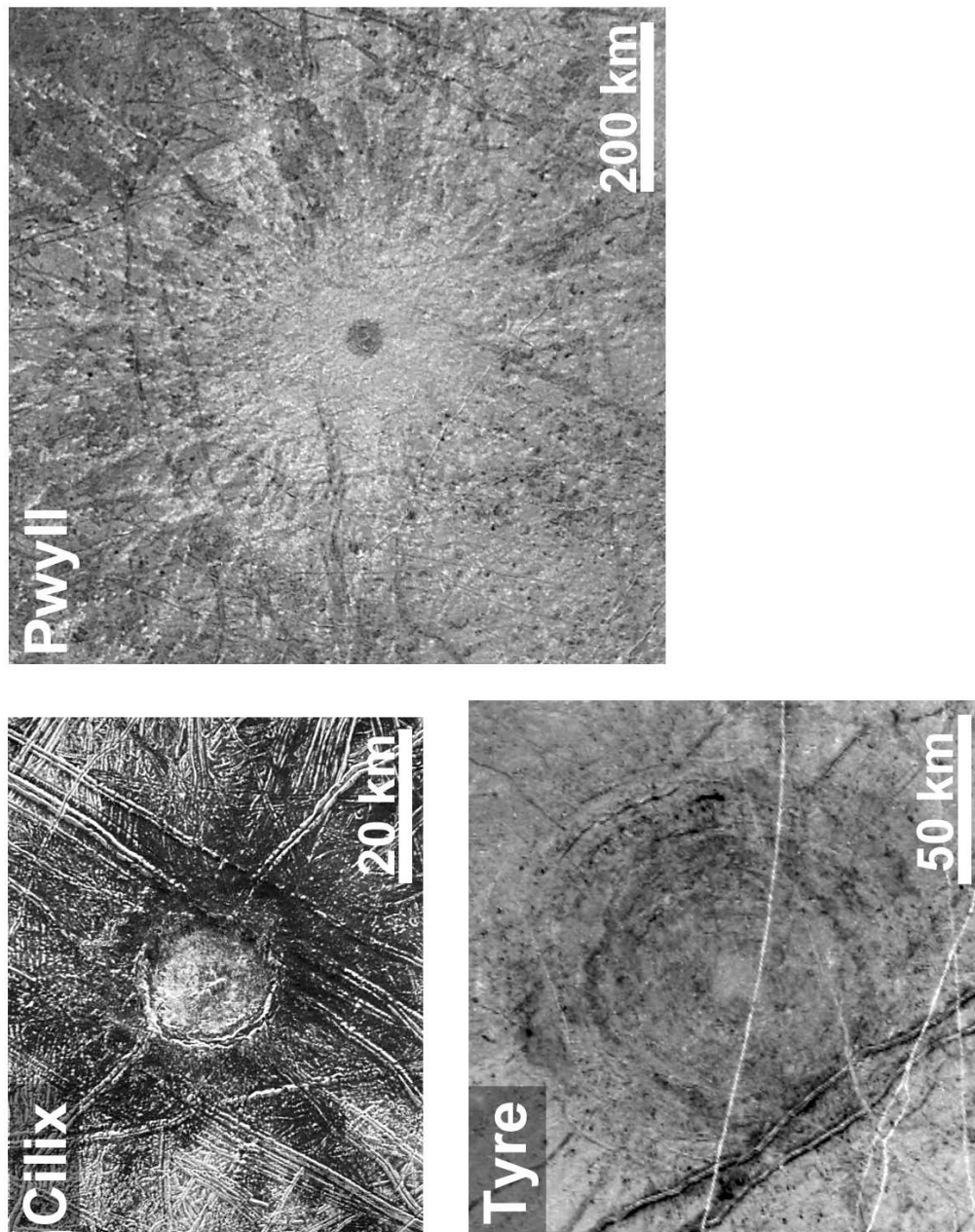


Abbildung 8.8.: Krater auf Europa: Cilix, Pwyll und Tyre. *Cilix:* SSI-Daten (Zielgebiet 15ESCILIXS01, VLT-Filteraufnahme 15E0021, 110 m/pxl); *Pwyll:* Ausschnitt eines Mosaiks der Europa-Heckseite, (Zielgebiet E4ESGLOBAL01, SSI-Aufnahmen E4E0002 und E4E0004, 1.3 km/pxl); *Tyre:* SSI-Daten des Zielgebiets 14ESTYREHR01, SSI-Aufnahme G7E0040, 180 m/pxl; Norden zeigt in allen vier Bildern nach oben. Weitere Erläuterungen im Text.

Geol. Einheit	N_{cum} ($D \geq 1$ km)	Model I [Ma]	Model IIa [Ma]	Model IIb [Ma]
<u>Cilix:</u> <i>cif</i>	$< 4.38 \cdot 10^{-6}$	< 13.0	< 0.1 (0.9, 0.04)	< 1.0 (2.0, 0.2)
<u>Pwyll:</u> <i>pwf</i> <i>pwe</i>	$< 1.65 \cdot 10^{-5}$ $8.22 \pm 0.35 \cdot 10^{-5}$	< 50.0 245.0 ± 103	< 1.0 (3.0, 0.14) 3.0 (17.0, 0.7)	< 2.0 (2.0, 0.8) 120 (350, 39)
<u>Mannan'an:</u> <i>maf</i>	$1.45 \pm 0.48 \cdot 10^{-5}$	43.0 ± 0.15	1.0 (3.0, 0.12)	2.0 (6.0, 0.7)
<u>Tyre:</u> <i>tye</i>	$2.62 \pm 0.63 \cdot 10^{-4}$	780.0 ± 184	11.0 (53.0, 2.1)	37.0 (109, 12)

Tabelle 8.3.: Kumulative Häufigkeiten und Modellalter ausgewählter Europa-Krater. Die Modellalter sind hier abweichend zu Tabelle 8.2 in Einheiten von [Ma] (Millionen Jahren) angegeben.

und Callanish sind durch konzentrische, ringförmige Massive charakterisiert, die einzigen nennenswerten topographischen Erhebungen in diesen Kratern (Moore *et al.*, 1998, 2001). Relativ glatte, annähernd kreisförmige Zonen (*smooth central unit*) bilden die Zentren der beiden Impaktstrukturen. Eines der Ringmassive repräsentiert den eigentlichen Kraterdurchmesser, der nach Turtle *et al.* (1999) bei 45 km (bzw. 47 km bei Callanish) liegt. Außerhalb dieses Kraterandes bis etwa 100 km vom Einschlagszentrum entfernt schließen sich kontinuierliche Ejekta an, in denen weitere Ringmassive und Ringgräben auftreten (Moore *et al.*, 1998, 2001). Ringgräben kommen bis in die Zone der Sekundärkrater (150 km Entfernung vom Zentrum) vor (ebd.).

Alle diese Krater lassen sich durch Einschlagskraterhäufigkeiten datieren bzw. zumindest abschätzen. Die Modellalter sind in Tabelle 8.3 aufgeführt. Jüngster der drei Krater ist Cilix mit einem *Model-I*-Alter (abgeschätzt auf dem Boden (*cif*)) von weniger als 13 Ma (Neukum *et al.*, 1999). Für die beiden Varianten des Kometenmodells liegt das Alter unter 1 Ma.

Auch auf den mit 150 m/pxl aufgelösten Farbdaten (SSI-Zielgebiet 12ESPWYCOL01) ist kein Krater auf dem Boden von Pwyll (*pwf*) zu finden. Die Abschätzung unter der Annahme eines einzigen Kraters bei 450 m/pxl ergab Modellalter (*Model-I*-Alter von ≤ 50 Ma und liegt bei den beiden Kometenmodellen noch unter 1 Ma (Neukum *et al.*, 1999). Neuere Messungen in den kontinuierlichen Ejekta (*pe*) auf den höher aufgelösten Daten des Zielgebietes E6ESCRATER02 (56 m/pxl) ergaben ein deutlich höheres Alter (*Model I*) von 245 Ma (Tabelle 8.3). Allerdings ist diese Messung relativ ungenau, da die hohen Albedokontaste des Messgebietes eine sichere Erkennbarkeit kleiner Krater erschweren. Das jüngere Alter aus der Abschätzung entspricht daher wohl eher dem tatsächlichen Alter des Kraters. Zum Vergleich: Beim Pwyll morphologisch ähnlichen Krater Mannan'an (3° Nord, 240° West, 22 km Durchmesser, von der SSI-Kamera im Zielgebiet 14ESCRATER02 mit 20 m/pxl abgebildet) liegt das *Model-I*-Alter (Kraterboden (*maf*) bei 43 Ma (Tabelle 8.3) (Neukum *et al.*, 1999).

Die Kraterhäufigkeiten und Modellalter, die in den beiden "Palimpsesten" Tyre oder Callanish gemessen wurden, sind deutlich höher als die der klassischen Europa-Krater. Das Modellalter (*Model I*) liegt bei Tyre in der Größenordnung von 780 Ma (gemessen in den Ejekta (*tye*);

Tabelle 8.3). Eine ähnliche Spanne von Modellaltern wurde auch aus den Messungen in den Einheiten von Callanish abgeleitet (*Neukum et al.*, 1999).

8.2.7. Ein Blick ins Nachbarsystem: Strahlenkrater auf dem Saturnmond Rhea

Seit dem Eintritt der Sonde **Cassini**⁵⁴ in eine exzentrische Umlaufbahn um den Ringplaneten Saturn am 1. Juli 2004 und dem Beginn von insgesamt 74 geplanten Umrundungen während der nominellen Cassini-Mission (nicht gerechnet eine bereits genehmigte *Extended Mission* zwischen 2008 und 2010) liefern die beiden Kameras umfangreiches und qualitativ hochwertiges Bildmaterial von den Saturn-Eissatelliten - anders als bei Galileo nicht beeinträchtigt durch den Ausfall der Hauptantenne. Im Gegensatz zu Galileo stehen auf Cassini eine Weitwinkel- (WAC) und eine Telekamera (NAC) im ISS-Experiment (**I**maging **S**cience **S**ubsystem) zur Verfügung (*Porco et al.*, 2004).

Bei größeren Einschlägen in geologisch jüngerer Zeit (d. h. $\ll 3$ Ga) entstehen nicht notwendigerweise auf jedem Eissatelliten ausgedehnte Strahlensysteme. Die ISS-Kameradaten der beiden mittelgroßen Saturnsatelliten **Dione** (1124 km Durchmesser, $1.477 \pm 0.004 \text{ g cm}^{-3}$ mittlere Dichte) und **Rhea** (1528 km Durchmesser, $1.233 \pm 0.005 \text{ g cm}^{-3}$ mittlere Dichte; Werte für die beiden Satelliten nach *Thomas et al.*, 2006) belegen dies: Lediglich auf Rhea ist bei einer Breite von 12° S und Länge von 112° West ein etwa 38 km großer, heller, stratigraphisch junger Strahlenkrater mit einem über mehrere Hundert Kilometer sich erstreckenden Strahlensystem nachzuweisen, während sich auf dem Nachbarmond Dione - ebenso nach bisherigem Kenntnisstand auch auf den übrigen atmosphärelosen Eissatelliten von Saturn - kein derartiger Krater dieser Größe befindet (*Wagner et al.*, 2006a,b). Für diesen Krater soll der Name *Iktomi* eingereicht werden⁵⁵.

Bild 8.9 zeigt den Strahlenkrater bei unterschiedlichen Bildauflösungen. Rhea ist geprägt von einer sehr dicht mit Kratern und Becken bedeckten Oberfläche, wie aus der globalen Ansicht (Bildnummer N1511700120, Daten des Clear-Filters bzw. der Filterkombination CL1/CL2 der Telekamera NAC, Bildauflösung 1.76 km/pxl) in Abb. 8.9 hervorgeht. Das Strahlensystem des Kraters hebt sich deutlich heraus. Die Kraterränder im vergrößerten Detailbild, einem Ausschnitt des ISS-Bildes N1511726954 (NAC, Filter CL1/CL2, 466 m/pxl Auflösung) erscheinen scharf und deuten ebenfalls auf einen stratigraphisch jungen Krater hin.

Unmittelbar bei der nächsten Annäherung an Rhea während der mit der Nummer 018 bezeichneten Umrundung (November 2005) nahm die WAC-Kamera ein Gebiet auf, das den östlichen Kraterrand, den angrenzenden Boden und einen Teil der Ejekta abdeckt (Bildnummer W1511737577, panchromatische Filterkombination CL1/CL2, 32 m/pxl Auflösung). Das Ergebnis ist überraschend: Entgegen der stratigraphischen Position dieses Krates sind Kraterboden und einige Bereiche unmittelbar außerhalb des Kraterrandes von einer Vielzahl kleinerer Krater übersät, die teilweise in Gruppen angeordnet sind oder unregelmäßige Formen aufweisen, somit also alle Kennzeichen von Sekundärkratern vereinen (weiße Pfeile in Bild 8.9). Lediglich der

⁵⁴Die Sonde wurde am 15. Oktober 1997 von der Erde gestartet.

⁵⁵Der Name *Iktomi* entstammt der Mythologie der Dakota-Indianer in Nordamerika. Namen auf dem Saturnmond Rhea sind Schöpfungsmythen der Naturvölker entlehnt.

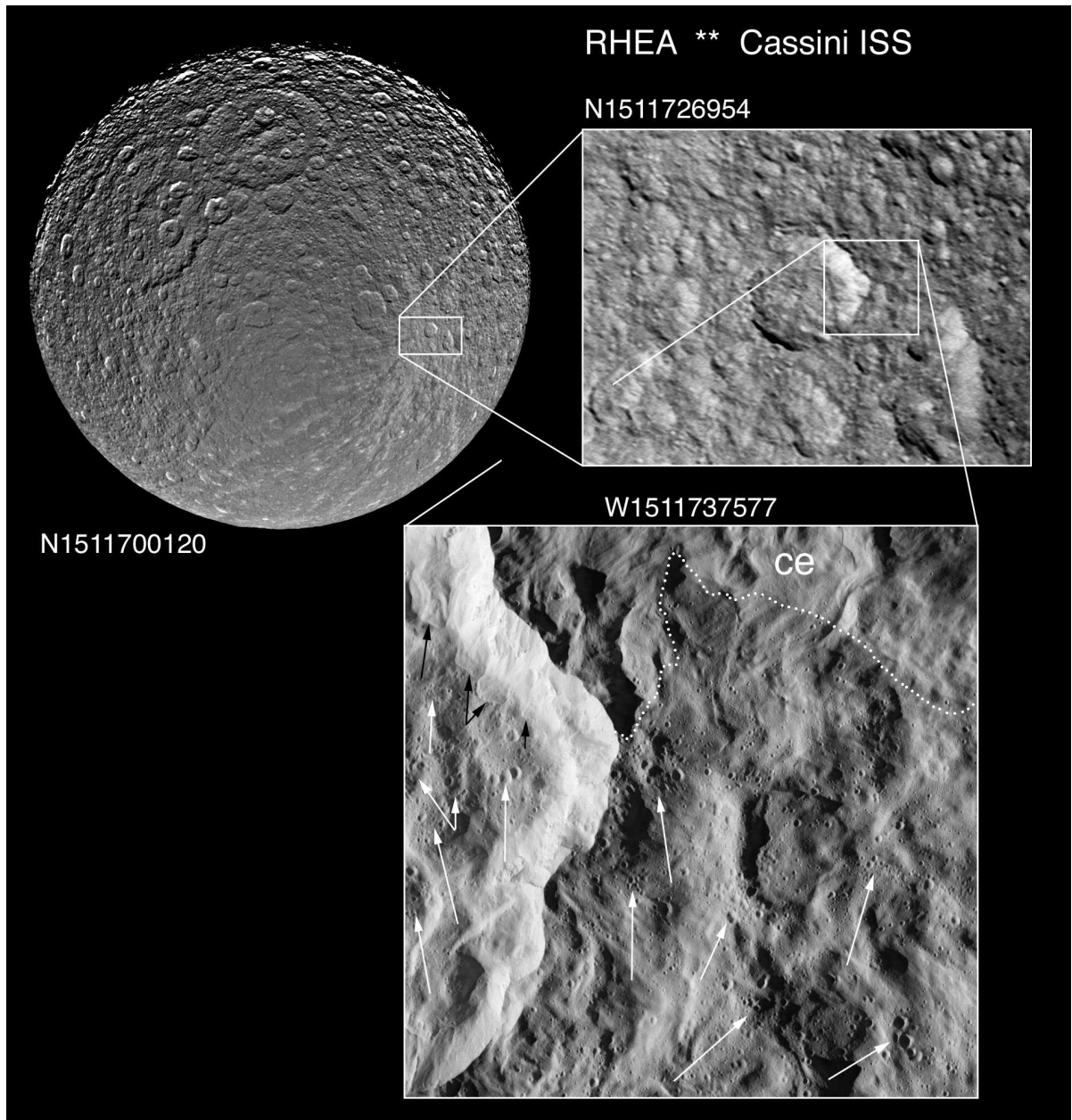


Abbildung 8.9.: Strahlenkrater auf dem Saturnmond Rhea. Aufnahmen der ISS-Kameras (NAC und WAC) an Bord der Cassini-Sonde von Dezember 2005, Vorbeiflug 018RH.

obere Bereich der WAC-Aufnahme ist wenig bekratert und stellt vermutlich die kontinuierlichen Ejekta ohne Sekundärkrater dar (in Abb. 8.9 durch *ce* und gepunktete Linie angezeigt). Eine Datierung dieser Einheit ergab ein Alter von **2.48 Ga** in *Model I* (Chronologiemodell für das Saturnsystem: (Neukum et al., 2006); Datierung noch unveröffentlicht) bzw. von **71 Ma** (280 Ma, 18 Ma) in *Modell IIb*. Dieses Alter entspricht vermutlich dem Alter des Einschlags.

Da aus den vorliegenden ISS-Bilddaten nicht eindeutig hervorgeht, dass ein stratigraphisch jüngerer Krater in der Umgebung liegt, der als Ursprung dieser Sekundärkrater in Frage kommt, bleibt als Alternative, dass diese kleinen Krater bei der Entstehung des Strahlenkraters selbst entstanden sind. Greeley et al. (1982) trafen bei Impaktsimulationen im Labor auf Fälle, wo Material unter einem sehr steilen Winkel in Zusammenhang ausgeworfen wurde und teilweise wieder ins Innere des Kraters zurückfiel. Dies ereignete sich bei Versuchsreihen mit einem lockeren Verband von Teilchen aus Quarzsand über einem viskosen Material zur Simulation eines Target-Materials mit Schichten unterschiedlicher Rheologie. Es ist daher zu vermuten, dass genau dieser Fall hier in der Natur erstmals nachweisbar ist. Ob daneben ein tatsächlich noch jüngerer Krater in der Umgebung vorhanden ist, der Quelle dieser kleineren Krater ist, sollen weitere hoch aufgelöste Bilddaten bei einem gezielten Vorbeiflug an Rhea Ende August 2007 klären.

8.2.8. Geologische Prozesse in der Burrianischen Periode

Das jüngste chronostratigraphische System auf Callisto (ebenso auch auf Ganymed und Europa) ist durch Strahlenkrater der lithostratigraphischen Gruppe *c₃* charakterisiert. Es wird durch einen besonders markanten Vertreter dieser Gruppe definiert, der die Basis bildet, oder zumindest zeitlich nahe der Basis des Systems liegt. Problematisch in der genauen stratigraphischen Abgrenzung ist, dass sich (a) nie alle Strahlenkrater einer beliebigen Oberfläche gegenseitig überdecken, um ihre Altersbeziehungen abzuleiten (vergl. Mutch, 1972), und (b) die derzeit von den Galileischen Satelliten verfügbaren Bildabdeckungen und -auflösungen zur Datierung aller Strahlenkrater nicht ausreichend sind.

Lediglich durch Abschätzungen von Krateraltern lässt sich derzeit der Beginn der jüngsten Periode auf Callisto festlegen. Die abgeschätzten *Model-I*-Alter von mehr als 3 Ga für den Basishorizont sind sicher zu hoch. Alter um 1 - 2 Ga oder weniger, vergleichbar den lunaren Kratern der jüngsten (Copernicanischen) Periode, dürften eher den tatsächlichen Altern dieser Krater entsprechen. Unproblematisch ist die Definition der oberen Grenze: Sie ist durch die Gegenwart gegeben.

Lediglich zwei geologische Prozesse liefen während der jüngsten Periode auf Callisto ab, bzw. sind noch in der Gegenwart aktiv: (1) gelegentliche Meteoriteneinschläge bei konstanter Impaktrate. Dazu gehört auch das Bombardement mit kleinsten Teilchen (Staub) durch das mit Jupiter korotierende Magnetfeld, das Callisto mit jeder vollen Jupiterrotation "überholt" (vergl. Grün et al., 1998). (2) Ein weiterer Prozess sind bis heute stattfindende Sublimations- und Erosionsvorgänge, allerdings ist nicht bekannt, mit welcher Rate diese verlaufen (siehe unten).

Erosionsprozesse und -raten sind neben dem täglichen Temperaturverlauf gebunden an das Vor-

handensein bestimmter Oberflächenmaterialien. Neben Wassereis konnten *McCord et al.* (1998) mehrere Nicht-Eismaterialien nachweisen, darunter Verbindungen, die C-H, S-H, und C-N enthalten, weiterhin SO_2 und CO_2 . Letzteres sublimiert schneller als Wassereis. In der NIMS zugänglichen obersten Oberflächenschicht (maximal etwa 1 mm) stellt Kohlendioxid mit einem ausgeprägten Absorptionsband bei $4.26 \mu\text{m}$ nur ein Spurenelement dar, das im dunklen Nicht-Eismaterial vorkommt (etwa 0.4 % Gewichtsprozent (*Hibbitts et al.*, 2002)). *Stephan* (2006) wies nach, dass das Absorptionsband von Kohlendioxid stark an den Reflexionsgrad der Oberfläche im Wellenlängenbereich größer als $3 \mu\text{m}$ gebunden ist: je niedriger der Reflexionsgrad, umso auffallender die Absorptionsbande von rmCO_2 . Dass die Absorptionsbande von Kohlendioxid auf Callisto stärker ausgeprägt ist als auf Ganymed, ist demnach eher durch den unterschiedlich hohen Reflexionsgrad der beiden Satellitenoberflächen bei diesen Wellenlängen zu erklären (ebd.).

Wenig gesichert ist, wie schnell die vermutlich nur wenige Meter dicken Kraterstrahlen bei Anwesenheit von CO_2 erodiert werden. Erosionsraten (bzw. Ablationsraten) durch *sputtering* geladener Teilchen könnten auf Ganymed in der Größenordnung von 1 Giga-Jahr zum weitgehenden Verschwinden der Strahlen führen (*Shoemaker et al.*, 1982). Wegen der geringeren Wirkung des *sputtering* auf Callisto aufgrund der größeren Entfernung von Jupiter ist von wenigstens einem ähnlichen oder aber auch höherem Alter für Strahlenkrater auf Callisto auszugehen. Die Erosion der Strahlen wird wahrscheinlich aber durch das Vorhandensein von CO_2 "getriggert".

Hibbitts et al. (2002) fanden, dass der Frischegrad der Strahlenkrater mit dem Gehalt an CO_2 korreliert ist: Je frischer der Krater, umso markanter die Absorptionsbande und umso höher der Gehalt an Kohlendioxid. Die genaue Korrelation zwischen dem Grad der Abtragung der hellen Krater *BVc* und dem Kohlendioxid-Gehalt kann mit dem vorliegenden Bildmaterial nicht nachgeprüft werden. Hierzu wäre eine globale Abdeckung von Callisto mit Bilddaten von wenigstens 200 m/pxl erforderlich, um die Krater einzeln zu datieren.

Das Vorhandensein von CO_2 in diesen Kratern und ihren Ejekta (vergl. hierzu *Hibbitts et al.*, 2002) könnte eine zu große Altersspanne jedoch einschränken, da es zu einer rascheren Verflüchtigung der Strahlen beitragen würde. In diesem Fall müssten eher die Alter nach *Model IIa/IIb* von wenigen 100 Ma dem tatsächlichen Alter dieser Krater entsprechen.

Wie in den folgenden Abschnitten näher erläutert, sind markante Abtragungsformen der Callisto-Oberfläche ein Hauptcharakteristikum des äußersten Galileischen Satelliten, im Gegensatz zur Oberfläche von Ganymed. *Moore et al.* (1999) schrieben dies der höheren Sublimationsrate von CO_2 zu. NIMS kann nur die oberste Schicht der Oberfläche detektieren, und nach den spektralen Messungen von *Hibbitts et al.* (2002) beträgt der Anteil von CO_2 hier nur etwa 0.3 - 0.4 Gewichtsprozent. Für die zahlreichen Abtragungsformen auf Callisto ist demnach ein signifikanter Kohlendioxidanteil im Eisanteil der Kruste von mehreren Zehnerprozent notwendig, wie *Moore et al.* (1999) schlussfolgern. Der niedrige Anteil von CO_2 in den Strahlenkratern von $< 1 \%$ ist somit sicher nicht mehr der Urzustand nach der Bildung des Kraters, da Kohlendioxid stetig sublimiert, sofern es nicht in Mineralen oder Clathraten gebunden ist.

Die rezent anhaltende Sublimation von Kohlendioxid aus einer vermutlich CO_2 -reichen Kruste zeigt sich im Vorhandensein einer sehr dünnen Atmosphäre, die durch Analyse der NIMS-Daten nachgewiesen wurde (*Carlson*, 1999). Die Atmosphäre erstreckt sich bis zu einer Höhe von et-

wa 100 km. Der Oberflächendruck ist mit $7.5 \cdot 10^{-7}$ Pa extrem niedrig, die Temperatur wird auf 150 ± 50 K geschätzt (ebd.). Ionisationsprozesse durch UV-Strahlung könnten Kohlendioxid freisetzen. Ausgehend von einem derartigen Prozess fand *Carlson* (1999) eine sehr niedrige Lebensdauer der Atmosphäre von nur 4 Jahren. Entweder ist die Atmosphäre ein vorübergehendes Phänomen, oder CO₂ wird durch Sublimationsprozesse stetig nachgeliefert (ebd.). In letzterem Fall könnte die Atmosphäre geologische Zeiträume (d. h. mehr als 1 Ga) überdauern. Einschläge könnten frisches, CO₂-führendes Material an der Oberfläche exponieren. Problematisch ist nur, dass größere Einschläge, durch die wesentliche Mengen an die Oberfläche gelangen, eher seltene Ereignisse sind. Als alternative Interpretation bietet sich daher, zusätzlich zur Exponierung durch Impakte, langsame, stetige Ausgasung einer durch zahlreiche Einschläge deformierten oberen Kruste an (ebd.).

Hibbitts et al. (2000) fanden in den NIMS-Daten ein sinuoidales Muster in der CO₂-Verteilung auf der Callisto-Heckseite, dessen tiefste Absorption etwa bei 270° W liegt. Feinkörniger, möglicherweise CO₂-führender Staub, der mit der Jupitermagnetosphäre mit rotiert und die Heckseite bombardiert, könnte für dieses Muster verantwortlich sein (*Grün et al.*, 1998; *Hibbitts et al.*, 2000). Als weitere mögliche Prozesse, ebenfalls in Zusammenhang mit dem korotierenden Jupitermagnetfeld, führen *Hibbitts et al.* (2000) (1) Radiolyse von Kohlenstoff- und Sauerstoffatomen auf, (2) *sputtering* von Wassereis, wodurch sich allmählich eine CO₂-führende Ablagerung bildet, oder (3) strukturelle oder chemische Veränderung dunklen Materials durch Strahlungswirkung der Magnetosphäre. Der Prozess, der dieses sinusoidale Muster erzeugte, ist rezent noch in Gang, müsste aber wegen der Flüchtigkeit von CO₂ bereits über geologische Zeiträume, d. h. seit mindestens 1 - 2 Ga aktiv sein.

Neben den hellen Strahlenkratern zählen Kraterketten mit teilweise noch relativ scharfen Rändern der Einzelkrater zu den jüngeren Impaktstrukturen. Sie sind nach Ansicht von *Melosh und Schenk* (1993) durch zerplatzte Projektile entstanden, ähnlich den Fragmenten des Kometen P/Shoemaker-Levy (SL-9), deren Einschläge auf Jupiter 1994 direkt beobachtet werden konnten. Die Kraterketten bilden aber eine Ausnahme in der Korrelation junges Alter - Kohlendioxidgehalt: Keine dieser Ketten ist reich an CO₂ (*Hibbitts et al.*, 2002). Die Autoren schlossen daraus, dass es nicht durch den Impaktprozess eingebracht wurde, sondern Bestandteil des Krustenmaterials ist. Da anzunehmen ist, dass bei Einschlägen generell CO₂ freigesetzt wird, könnte dessen Fehlen bei Kraterketten auf ein höheres Alter dieser Strukturen hindeuten, als es ihre zeitstratigraphische Einordnung aufgrund des Frischegrades zur Einheit *BVca* vermuten lässt.

Ob bei den Impakten in der jüngsten Periode neben regulären Kratern auch noch Dom-Krater oder Penepalimpseste entstehen können, die plastisches Material in nicht zu großer Tiefe erfordern, ist unklar. Einige wenige Dom-Krater sind sehr hell, erscheinen relativ frisch und weisen Strahlen auf, sind wegen mangelnder Auflösung aber nicht zu datieren. Die Aufstellung einer jüngsten Einheit *BVd* von Dom-Kratern mit Valhalla als absoluter und Burr als möglicher unterer zeitlicher Grenze erscheint zumindest vertretbar, bedarf aber einer genaueren Nachprüfung in Bilddaten einer zukünftigen Mission.

Zu den jüngeren Erosionformen gehören vermutlich auch pfannkuchen-förmige Schuttströme (*debris avalanches*), die im Inneren einiger Krater nachzuweisen sind (vergl. Bild 8.37) und möglicherweise durch Impakte induzierte seismische Erschütterungen entstanden (*Moore et al.*, 1999;

Chuang und Greeley, 2000). Datierungen dieser Formen durch Kratermessungen sind meist nicht möglich, da die Bildauflösung nicht ausreicht und die Flächen sehr klein sind, die Kraterhäufigkeit meist nur abgeschätzt werden kann. Diese Alter schwanken in *Model I* zwischen 3.7 Ga und 1.8 Ga, in *Model IIa/IIb* entsprechend zwischen 500 Ma und weniger als 100 Ma.

Die Altersspannweite der Strahlenkrater auf Ganymed und Callisto ist vermutlich ähnlich. Die jüngste Periode würde somit auf beiden Satelliten etwa den gleichen Zeitraum überdecken, dies allerdings nur unter der Voraussetzung ähnlicher Erosionsraten. Wegen unterschiedlicher CO₂-Gehalte auf beiden Satelliten ist dies jedoch keineswegs gesichert.

Eine weitergehende Unterteilung der jüngsten geologischen Geschichte von Callisto (und Ganymed), analog zur Eratosthenischen und Copernicanischen Periode auf dem Erdmond, erfordert eine umfassendere Bildabdeckung hoher Auflösung, um die Strahlenkrater genau zu datieren und um eine mögliche Unterteilung anhand der Krater vom "Osiris-/Burr"-Typus (jüngeres System/Periode) und Kratern mit noch vorhandenen, aber bereits stärker abgetragenen Strahlen (älteres System/Periode) - wie beim Ganymed-Krater Melkart - vorzunehmen.

Gelegentliche Impakte und eine sehr langsam ablaufende Sublimationsverwitterung und -Abtragung sind die einzigen bis in die Gegenwart andauernden geologischen Prozesse auf Callisto, vermutlich seit ≈ 3 Ga. Genauere quantitative Messungen und Bestimmung des mengenmäßigen Anteils von Kohlendioxid und anderer, Sublimation und Abtragung beschleunigender Substanzen an der Oberfläche und in der Callisto-Kruste sind notwendig, um genaue Erosionsraten abzuleiten.

8.3. Obere Serie des Valhallischen Systems

8.3.1. Typlokalität

In den höheren südlichen Breiten der Jupiter zugewandten Callisto-Hemisphäre zeigten die Voyager-Daten zwei auffallend helle Einschlagsstrukturen mit mehreren 100 km Durchmesser und ausgedehnten hellen Strahlensystemen in unmittelbarer Nachbarschaft zueinander (*Smith et al., 1979a*). Detaillierte geologische Untersuchungen und Datierungen zumindest einer dieser beiden Strukturen wurden erst durch Daten des achten Galileo-Orbits ermöglicht, da sowohl die Daten von Voyager-1 wie auch frühere SSI-Daten (Zielgebiet G2CSVGRGAP01, 4.3 km/pxl) (a) nur geringe Auflösung aufwiesen, (b) aus schrägem Blickwinkel aufgenommen worden waren, und (c) der Sensor teilweise gesättigt war. Die Lage des Zielgebiets G8CSADLNDA01 (Auflösung 875 m/pxl) geht aus Bild 5.5 in Abschnitt 5.4.3 hervor.

Ein Mosaik, kombiniert aus SSI- (Orbits G2, G8 und I31) und Voyager-1-Daten zeigt Bild 8.10. In älteren auf Voyager basierenden Kartenwerken des U. S. Geological Survey ist die weiter westlich bei 56° Süd und 23° West gelegene der beiden Einschlagsstrukturen (**Lo** in Bild 8.10) mit *Adlinda* bezeichnet, die östlichere (**He**) ist namenlos, ebenso eine stark abgetragene Multiringstruktur (**Ad**). Der ältere Name "Adlinda" findet sich deshalb an der gleichen Stelle auch in einer Reihe von Veröffentlichungen (z. B. *Schenk, 1995*). Nach erster Durchsicht der

höher aufgelösten SSI-Daten von G8 wurden die Einschlagsstrukturen neu- bzw. umbenannt. Da Multiringbecken auf Callisto nach den Richtlinien des U. S. G. S. nach Orten, Krater dagegen nach Personen zu benennen sind, entschloss man sich, den (Orts-)Namen **Adlinda** für die noch unbenannte alte Multiringstruktur (**Ad** in Bild 8.10) zu verwenden. Die beiden hellen einander benachbarten Einschlagsstrukturen erhielten die Namen **Lofn** (vormals Adlinda, **Lo** in Abb. 8.10) und **Heimdall** (**He** in Abb. 8.10).

Lofn und Heimdall stellen Grenzfälle in der Zuordnung von Einschlagsstrukturen zu Becken oder Kratern dar, da sie sowohl Eigenschaften von Kratern als auch von Becken bzw. von Palimpsesten besitzen und von einzelnen Autoren entsprechend unterschiedlich eingruppiert wurden (als Krater: *Greeley et al.* (2000b, 2001); dementsprechend wurden beide Strukturen nach Personen benannt; als Becken: *Schenk und Moore* (1999); diese Arbeit). Auch die Angaben für den Kraterdurchmesser unterscheiden sich je nach Autoren: *Greeley et al.*, 2000b; 2001) geben hierfür 180 km an. *Schenk und Moore* (1999) dagegen lokalisieren den Kraterrand von Lofn etwa bei 330 km Durchmesser. Beide Durchmesser sind in Abb. 8.10 eingezeichnet. Für Grenzfälle zwischen Kratern und Becken wurde der Begriff *protobasin* geprägt (vergl. *Spudis*, 1993, und Zitate darin).

Der gute Erhaltungszustand Lofns, die gut einzuordnenden stratigraphischen Beziehungen zu den Einheiten in seiner Umgebung, die große Ausdehnung seiner Ejekta auf der Jupiter zugewandten Seite von Callisto, und die Möglichkeit, auf den höher aufgelösten SSI-Daten die Kraterhäufigkeit und damit das Alter von Lofn zu bestimmen, bilden eine gute Grundlage dafür, diese Einschlagsstruktur und ihre Ablagerungen als stratigraphischen Basishorizont zur Unterteilung der Callisto-Geschichte zu verwenden.

8.3.2. Geologie der Typlokalität und Umgebung

Aus dem Übersichtsbild 8.10 lassen sich folgende Altersverhältnisse ablesen: Die stark abgetragene Multiringstruktur Adlinda (**Ad**) wird durch Ejekta von Lofn (**Lo**) überdeckt. Lofn-Ejekta überdecken auch die benachbarte Impaktstruktur Heimdall (**He**). Heimdall wird von zwei jüngeren, frischen Kratern des Burrianischen Systems mit hellen Ejekta (**c₃**, bzw. *BVc*) überlagert. Lineare Anordnungen von annähernd gleich großen Sekundärkratern - ähnlich Kraterketten, aber ohne gegenseitige Berührung der einzelnen Krater - und Furchen (**ca**) gehen radial von Heimdall oder auch von den beiden jüngeren *c₃*-Kratern in Heimdall aus. Diese Sekundärkraterketten überlagern auch die hellen Lofn-Ejekta. Alle diese genannten Einheiten sind jünger als die umgebenden Kraterebenen, die in etwa Alter des Asgard-Beckens oder darüber aufweisen (siehe hierzu Abschnitte 8.5 und 8.6).

Die hier getroffene Abgrenzung der einzelnen geologischen Einheiten stimmt zum Teil mit den von *Greeley et al.* (2001) kartierten Einheiten überein, orientiert sich aber stärker an der Interpretation von Lofn zumindest als Proto-Becken. *Greeley et al.* (2001) benutzten zusätzlich Daten des abbildenden Spektrometers NIMS an Bord von Galileo zur weiteren Unterteilung.

Die Benennung und Kurzbezeichnung der Einheiten orientiert sich an der Zuordnung der Einhei-

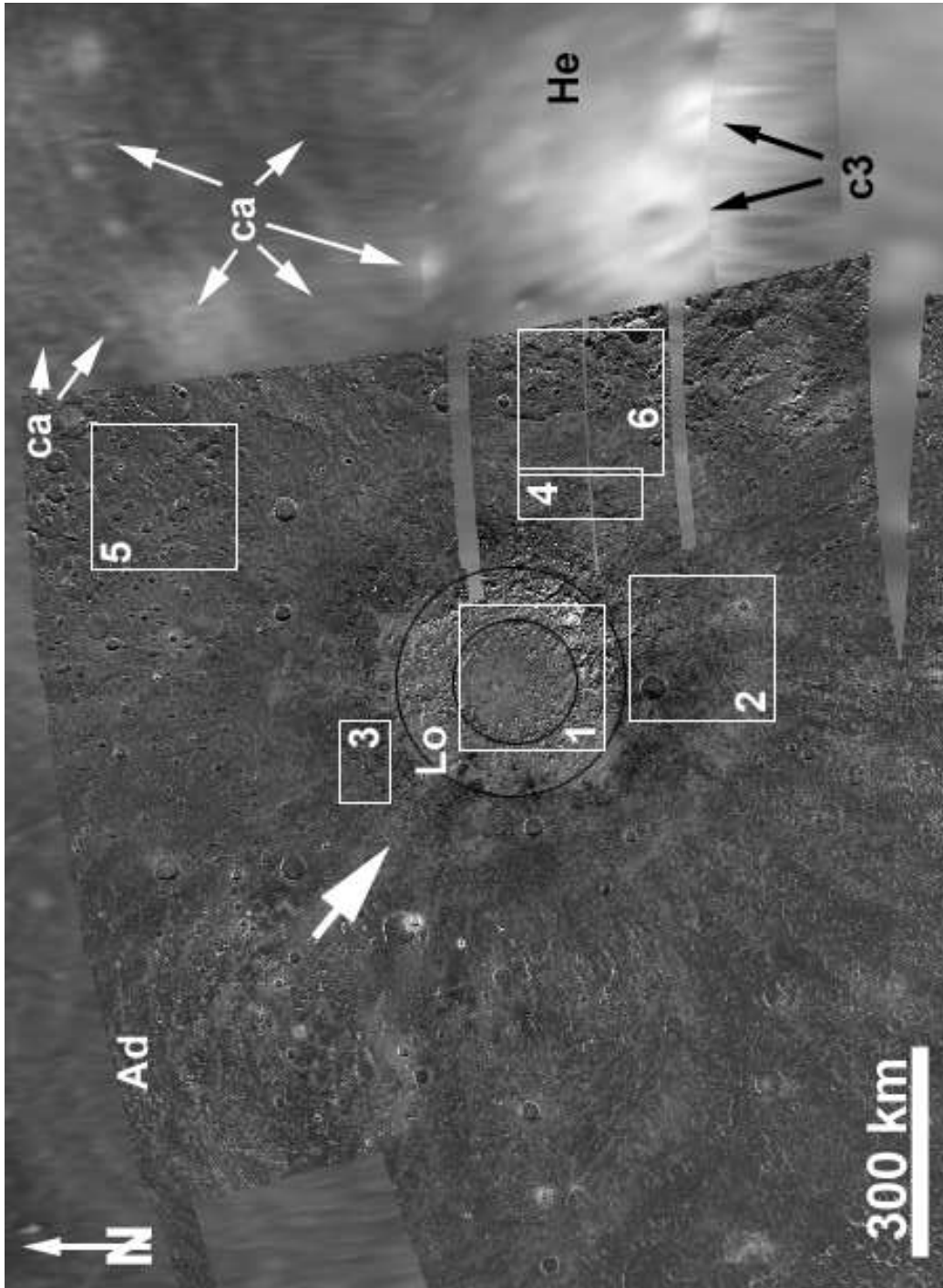


Abbildung 8.10.: Lofn und die angrenzenden Becken Adlinda und Heimdall in regionaler Bildauflösung (875 m/pxl) in Voyager- und SSI-Kontext. Morask des G8-Zielgebiets G8CSADLNDNA01 (Bildnummern: G8C0029 bis G8C0040) und angrenzender Zielgebiete (G8CSVGRGAP01, G8CSSPOLAR01) in polarstereographischer Projektion; Lage und Namen der Impactstrukturen: **Lo** = Lofn, **He** = Heimdall, **Ad** = Adlinda. Einbeschriebene Rechtecke: Detailansichten der geologischen Einheiten (Abb. 8.11 und 8.12); Kreise: vermutete Kraterdurchmesser (Schenk und Moore, 1999; Greeley et al., 2000b); siehe Text für weitere Erläuterungen.

ten Lofns zum Valhallischen System⁵⁶. Wie bei großen Einschlagsstrukturen üblich, werden alle in Lofn unterschiedenen geologischen Einheiten lithostratigraphisch als Formationen der nach dem Becken benannten **Lofn Group**, gekennzeichnet durch das Kürzel *lo* (diese Arbeit) oder *lf* (Greeley et al., 2001), betrachtet. Die nachfolgend kurz beschriebenen Einheiten sind im Detail in den beiden Abbildungen 8.11 und 8.12 dargestellt. Ihre Lage ist aus Bild 8.10 (einbeschriebene und nummerierte Rechtecke) ersichtlich.

1. **Vlob - Lofn central plains material:** Im Zentrum des Lofn-Beckens befindet sich eine annähernd kreisförmige, relativ helle und glatte Fläche mit einem Durchmesser von etwa 100 bis 120 km, auf der nur wenige Impaktkrater liegen (Bild 8.11 (1)). Die Einheit ist identisch mit der Einheit *lf1* von Greeley et al. (2001). Die Autoren interpretierten sie als Kraterboden. Nach Ansicht von Schenk und Moore (1999) entspricht sie dagegen einem glatten, flachen Dom innerhalb einer Zentralmulde, deren Rand hier durch die nach außen angrenzende Einheit *Vlor* markiert wird, ähnlich dem Dom-Krater bzw. dem Penepalimpsest) **Neith**. Eigene Untersuchungen dieses Ganymed-Kraters stützen die letztere Ansicht (Wagner et al., 1998b).
2. **Vlor - Rugged material:** Die Ebenen im Zentrum sind von einem zwischen 70 und 110 km breiten "Kranz" aus eng beieinander stehenden Hügeln oder Massiven von wenigen Kilometern Ausdehnung umgeben. Besonders im südlichen und südöstlichen Bereich erscheint diese Einheit stark zerklüftet, einzelne Massive können mehrere Zehnerkilometer Ausdehnung erreichen. Am nördlichen und nordwestlichen Rand sind die einzelnen Massive deutlich kleiner und niedriger. Der Grund für diese Asymmetrie dürfte in einem schiefwinkligen Einschlag aus nordwestlicher Richtung liegen (angezeigt durch den kurzen breiten Pfeil in Bild 8.10). Greeley et al. (2001), deren Einheit *lf2* weitgehend mit dieser Einheit *Vlor* übereinstimmt, kommen zur gleichen Schlussfolgerung. Sie interpretieren diese Einheit als den Kraterrand von Lofn, Schenk und Moore (1999) dagegen als Rand einer Zentralmulde (*central pit*).
3. **Vlob - Bright smooth material:** Diese durch helle, relativ glatte Bereiche mit vereinzelt auftretenden Hügeln gekennzeichnete Einheit grenzt westlich und nordwestlich an die Einheit *Vlor*. Sie wurde von Greeley et al. (2001) nicht als eigene Einheit unterschieden, sondern ist in deren Einheiten *lf2* und *lf3* mit enthalten. *Vlob* ist vermutlich das Ergebnis von Aufschmelzungen beim oder nach dem Impakt, bei denen wasserreiches Material an die Oberfläche gelangte. Isoliert kommen auch dunkle glatte Bereiche in dieser Einheit vor (**Vlod - dark smooth material**). Entweder handelt es sich um kleine, sehr dunkle Krater mit ihren Ejekta, oder analog zu *Vlob*, um dunkle Impaktschmelze.

Trotz der Beckengröße Lofns sind keine ausgeprägten Ringstrukturen festzustellen. Eine Ausnahme bildet der nordwestliche Bereich an der Grenze der Einheit *Vlob* zu den kontinuierlichen Ejekta (*Vloc*). An dieser Stelle (bereits innerhalb von *Vloc*) treten Ringbögen in Erscheinung, die sich im Detail als nach innen gerichtete Steilhänge (*inward-facing scarps*) erweisen (Abb. 8.12 (3)). Greeley et al. (2001) erwähnten diese Strukturen nicht.

⁵⁶Es ist in geologischen Kartenwerken des U. S. Geological Survey üblich, Kurzbezeichnungen für Einheiten lediglich einem bestimmten zeitstratigraphischen System, nicht aber einer Serie zuzuordnen.

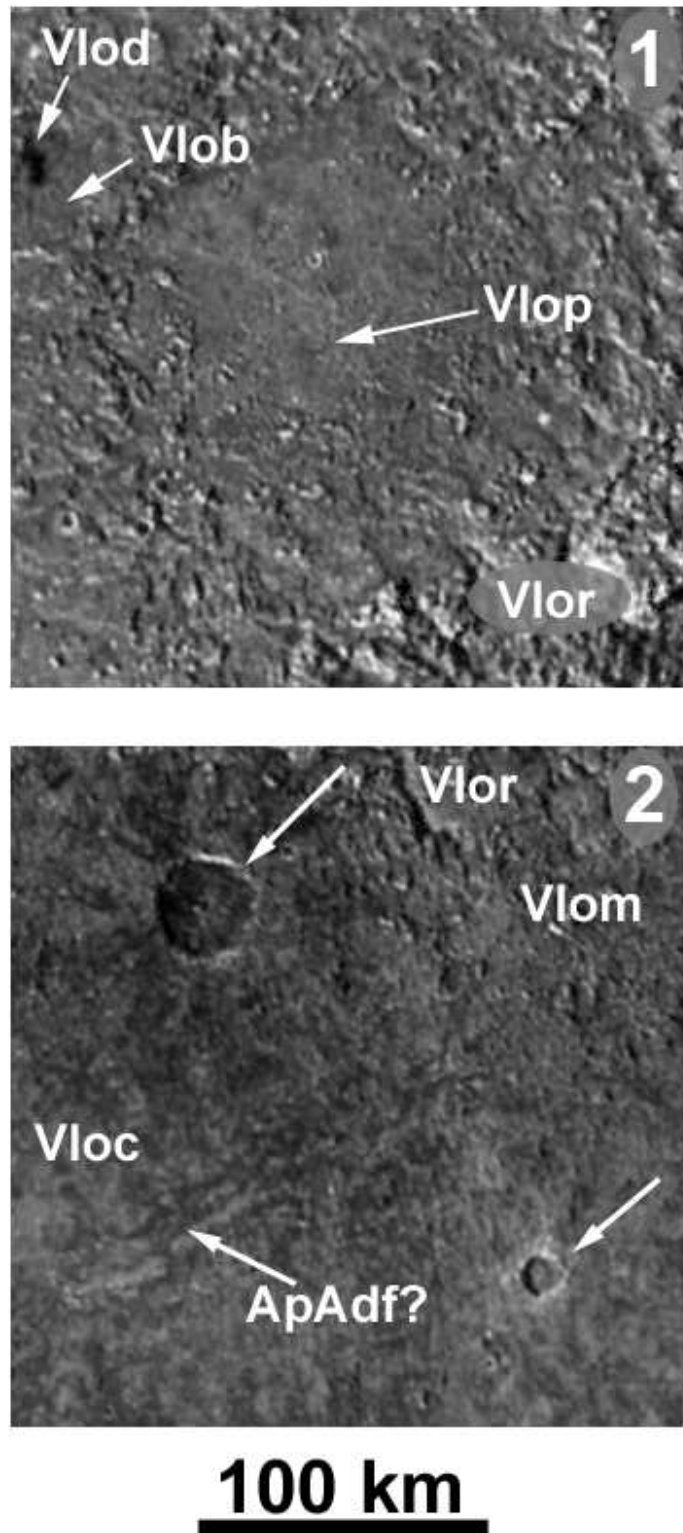


Abbildung 8.11.: Detailansichten geologischer Einheiten des Lofn-Beckens (1). Die Lage der beiden Ausschnitte 1 und 2 ist in Bild 8.10 angegeben. **1:** glattes Zentrum (Einheit *Vlop*), Krater- oder Muldenrand (*Vlor*); **2:** Rand (*Vlor*) und kontinuierliche Ejekta (*Vloc*). *ApAdf* ist vermutlich eine noch zum Adlinda-Becken gehörende Grabenstruktur Asgardisch/prä-Asgardischen Alters. Die beiden hellen Pfeile zeigen Krater an, die eindeutig jünger als Lofn sind. Weitere Erläuterungen im Text.

Nach *Schenk und Moore* (1999) liegt der nominelle Kraterradius von 330 km ziemlich genau an der Stelle dieser Steilhänge, einer von beiden könnte somit den Kraterrand darstellen. Unvollständige, beim Kraterentstehungsprozess nicht gut ausgebildete Ränder sind auch von anderen Kratern her bekannt, etwa dem Penepalimpsest Neith auf Ganymed (vergl. *Wagner et al.*, 1998b).

4. **Vlom - Mottled continuous ejecta material:** Diese Einheit tritt südlich und südöstlich angrenzend an *Vlor* auf. Hauptkennzeichen sind einzelne oder in Gruppen angeordnete Hügel mit nur wenigen Kilometern räumlicher Ausdehnung, die dem Gelände ein "gesprenkeltes" (*mottled*) Aussehen verleihen (Bild 8.11 (2)). Nach außen zu wird das Gelände glatter. Diese Einheit wird von *Greeley et al.* (2001) nicht als eigene Einheit kartiert, sondern ist dort Teil der Einheiten *lf3* und *lf4*. Hier wird *Vlom* als innere Fazies der kontinuierlichen Ejekta interpretiert. Lobenformen an den äußeren Grenzen der Einheit und der an einigen Stellen erkennbare Sockel (*pedestal*, durch Pfeile in Abb. 8.12 (4), angegeben) sprechen dafür, dass die kontinuierlichen Ejekta als Block- und/oder "Schlamm"strom über die Oberfläche transportiert wurden, also mit einer Mischung aus festen und flüssigen Anteilen (vergl. *Greeley et al.*, 2001).

Die Einheiten *Vlop*, *Vlor*, *Vlob* (mit *Vlod*), und *Vlom* - bzw. in der Kartierung nach *Greeley et al.* (2001) *lf1-3* - sind in den NIMS-Daten durch tiefe Wassereis-Absorptionsbanden charakterisiert, während außerhalb dieses Bereichs Absorptionsbanden des Nichteis-Materials, in diesem Fall CO₂ und Schwefel führende Substanzen, vorherrschen (*McCord et al.*, 1998). Das beim Impakt ausgeworfene Material kommt aus um so größerer Tiefe, je näher es am Krater liegt (*Melosh*, 1989). Der Lofn-Impaktor ist mit hoher Wahrscheinlichkeit in eine Wasser führende Schicht oder Schlamm (*slush*) vorgedrungen (*Greeley et al.*, 2001).

5. **Vloc - Smooth continuous ejecta material:** Beckenzentrum und (vermuteter) -rand werden von einer etwa 200 km breiten Zone glatten, kontinuierlichen Auswurfsmaterials umgeben (Bild 8.11, (2), und Bild 8.12 (3 - 6)). Diese Einheit entspricht der äußeren Fazies der kontinuierlichen Ejekta von Lofn. Sie ist, zumindest in dem Bereich, der etwa durch eine gedachte Linie von Nordost nach Südwest geteilt wird, im westlichen und nordwestlichen Sektor der Einheit *lf4* von *Greeley et al.* (2001) weitgehend identisch. Im südöstlichen Sektor unterschieden die Autoren eine Einheit *lf5*. Grund für diese Unterscheidung ist der nach ihrer Interpretation höhere Anteil an Nichteis-Material in *lf5* im Vergleich zu *lf4* aus den NIMS-Daten. Beide Einheiten werden von den Autoren als kontinuierliche Ejekta gedeutet. Allerdings liegen einige Bereiche der *lf5*-Einheiten bereits in den diskontinuierlichen Ejekta, die durch das Auftreten der Sekundärkrater morphologisch ziemlich gut von den kontinuierlichen abzugrenzen sind (Detailbild 8.12 (5)).

Die beiden in Bild 8.11 (2) durch Pfeile angezeigten Krater der Erosionsklasse *c₃* (bzw. *BVc*) sind eindeutig nach Lofn entstanden. Der größere der beiden Krater und seine strahlenförmigen Ejekta sind größtenteils dunkel, der kleinere der beiden Krater dagegen hell. Unterschiedlich helle Krater an unterschiedlichen Stellen im Umfeld des Lofn-Einschlags verdeutlichen vertikale Materialunterschiede in der Kruste.

Die mit **ApAdf?** in Bild 8.11 (2) bezeichnete Grabenstruktur gehört vermutlich noch zum

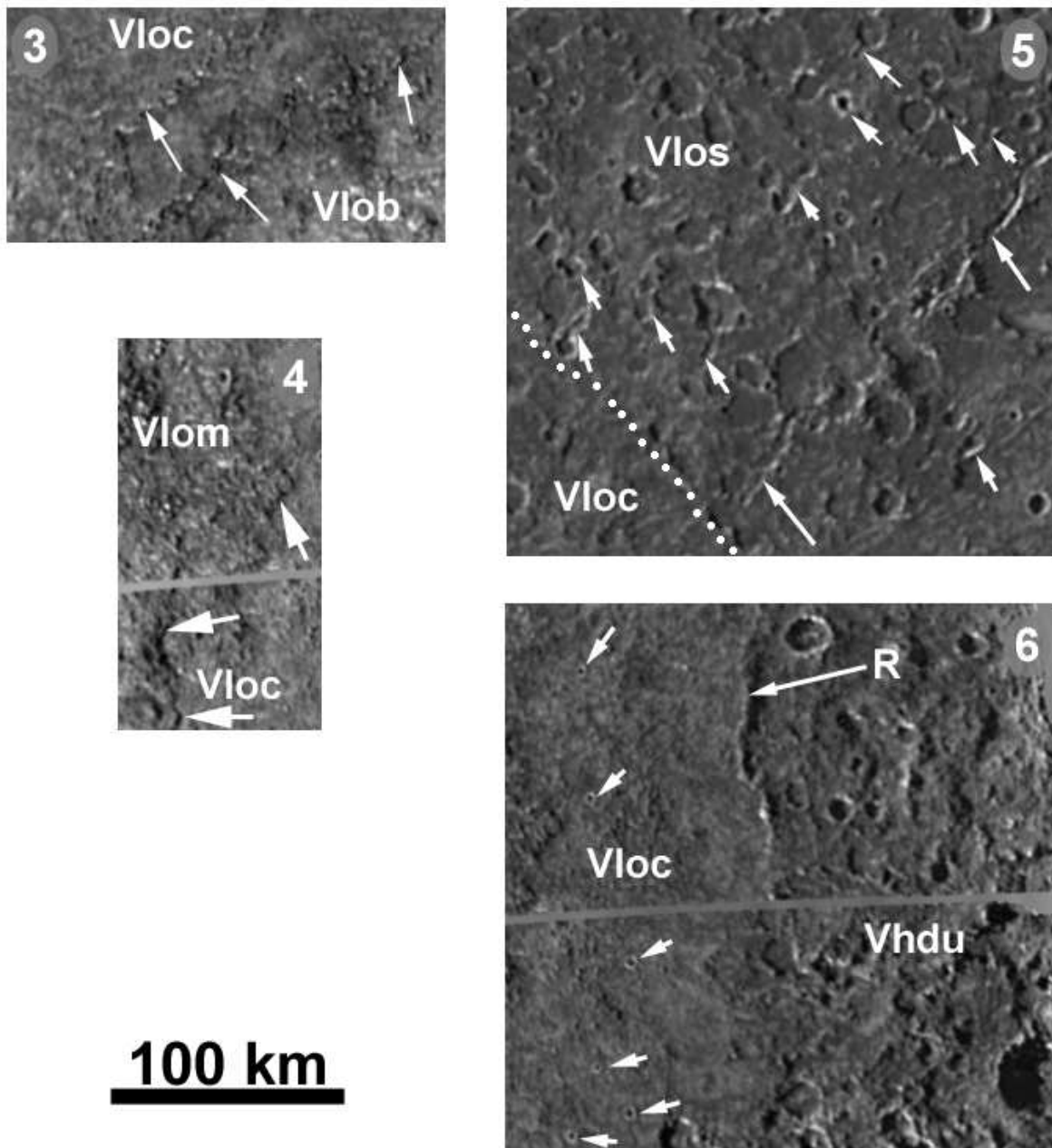


Abbildung 8.12.: Detailansichten geologischer Einheiten des Lofn-Beckens (2). Die Lage der vier Ausschnitte (3 bis 6) ist in Bild 8.10 angegeben. 3: Nach innen gerichtete Steilhänge (Pfeile); 4: innere Fazies der kontinuierlichen Ejekta mit Sockel (Pfeile); 5: Lofn-Sekundärkrater (*Vlos*) und radiale Furche (große Pfeile), Grenze von *Vloc* und *Vlos* durch gepunktete Linie angezeigt; 6: Grenze zwischen den kontinuierlichen Ejekta von Lofn (*Vloc*) und dem angrenzenden Heimdall-Becken (*Vhdu*) mit Lofn-Sekundärkratern, kurze Pfeile in *Vloc*: kleinere (post-Lofnische) Krater; **R**: Segment eines konzentrischen Bergrückens des Heimdall-Beckens. Weitere Erläuterungen im Text.

Adlinda-Becken⁵⁷. Trotz des kurzen Abschnitts liegt der Graben annähernd konzentrisch zum Zentrum des Beckens. Lofn-Ejekta haben den Graben weitgehend überdeckt.

6. **Vlos - Discontinuous ejecta and secondary craters:** Die diskontinuierlichen Auswurfsmassen des Lofn-Beckens sind gekennzeichnet durch (a) irregulär geformte Krater und radial angeordnete Ketten oder Gruppen von Kratern (Bild 8.12 (5)), durch (b) langgezogene, mehrere Zehnerkilometer lange Furchen (lange Pfeile), sowie durch (c) radial um das Becken verteilte hellere Flecken, die auch noch in größerer Entfernung vom Beckenzentrum in den Kraterebenen zu finden sind. Diese Einheit wird von *Greeley et al.* (2001) in die beiden Einheiten *lf5* und *lf6* aufgeteilt, eine hellere und eine dunklere Variante der diskontinuierlichen Ejekta, wobei die Autoren *lf5* noch zu den kontinuierlichen Ejekta zählen. Der Übergang von Einheit *Vloc* zu *Vlos* ist aber relativ scharf durch das Einsetzen der Lofn-Sekundärkrater (Bild 8.12 (5)). Im Nordosten konnten ein bis zwei lineare Furchen identifiziert werden.

Lofn weist kaum nennenswerte Topographie auf. Die größten Höhenunterschiede, gemessen durch Schattenlängen, betragen etwa 600 m (*Greeley et al.*, 2001). *Heiner et al.* (1998) kamen daraus zu dem Schluss, dass Lofn durch ein Projektil entstanden sein könnte, das kurz vor dem Einschlag in mehrere Bestandteile zerbrach, die dann in rascher Folge mehr oder weniger an der gleichen Stelle der Oberfläche auftrafen und für die flache Form dieses Kraters verantwortlich sein könnten, ähnlich wie beim 23 km großen terrestrischen Krater von *Rochechouart* (Frankreich). Für eine Entstehung durch ein zerbrochenes Projektil spricht auch, dass kein scharfer Kratertrand gebildet wurde: Unmittelbar einander nachfolgende Einschläge an der gleichen Stelle könnten zum Zerfall der durch die einzelnen Projektile sich bereits bildenden Kraterländer (*in statu nascendi*) geführt haben, so dass nur noch ein Kranz aus einzelnen Massiven oder Blöcken übrigblieb.

Greeley et al. (2001) vermuteten ferner, dass Lofn aus einem schiefwinkligen Einschlag unter $\sim 15^\circ - 20^\circ$ gegenüber der Oberfläche entstand. Derartige Schmetterlingsmuster von Ejekta (*butterfly pattern*) sind, wie auch im Fall von Burr, typisch für derartig niedrige Impaktwinkel (*Gault und Wedekind*, 1978).

Das Lofn im Südosten benachbarte Becken **Heimdall** ist nicht ausreichend durch Bilddaten abgedeckt. Auf niedriger aufgelösten Voyager-1- und Galileo-Daten ist ein heller, einem Palimpsest ähnlicher Fleck zu sehen. Ähnliches zeigen die mit 4.3 km/pxl aufgelösten SSI-Daten des Zielgebiets G2CSVGRGAP01 (im Hintergrund der G8-Daten, Bild 8.10). Die SSI-Daten des Zielgebiets G8CSADLNDA01 mit 875 m/pxl erfassten nur den westlichen Rand des Beckens bei sehr tief stehender Sonne.

Greeley et al. (2001) unterschieden auf der Basis dieser Daten vier Einheiten in Heimdall, zwei innerhalb des Kraters selbst (*h1* und *h2*), und zwei Ejektaeinheiten (*h3* und *h4*). Dieser Einteilung wird hier nicht gefolgt. Bereits auf den Voyager-Daten war bei geeigneter Kontraststreckung und Anwendung eines räumlichen Filters trotz weitgehender Sättigung des Sensors festzustellen, dass mindestens zwei hellere, jüngere Krater der Gruppe *c₃* auf Heimdall vorhanden sind. Nach

⁵⁷Die Bezeichnung *ApAdf* rührt von der möglichen stratigraphischen Zuordnung in das Asgardische oder Prä-Asgardische System her (siehe Abschnitte 8.5 und 8.6).

Sichtung der letzten von diesem Gebiet zur Erde übermittelten, allerdings niedrig aufgelösten Daten des SSI-Zielgebietes 31CSJOVHEM01 (ein Einzelbild mit ≈ 6 km/pxl) kann dies zweifelsfrei bestätigt werden, wie Abb. 8.13 verdeutlicht. Die von *Greeley et al.* (2001) unterschiedenen Einheiten *h1* bis *h3* gehören zum Großteil zu diesen Kratern.

In den niedrig aufgelösten Voyager-1- und SSI-Daten des Zielgebiets G2CSVGRGAP01 ist bei Heimdall wie bei Lofn ein heller, annähernd kreisförmiger innerer Bereich ("Palimpsest") mit einem Durchmesser von mindestens 300 bis 350 km charakteristisch. Der westlichste Teil dieser hellen Einheit ist in der höher aufgelösten Aufnahme von G8 (Bild 8.10 und Bild 8.12, unten) vermutlich noch enthalten, aber wegen des niedrigen Sonnenstandes nicht exakt als helle Einheit zu erkennen. Sie wird als **Vhdu - Heimdall basin material, undivided** kartiert. Die in den niedrig aufgelösten Bilddaten ähnliche Albedo von Lofn und Heimdall und ihre gut erhaltenen hellen Ejekta lassen ebenfalls auf verhältnismäßig junge Becken schließen.

Der in der Detailaufnahme 8.12 (6) zu erkennende Rücken (bezeichnet mit **R**) könnte dem Kratertrand entsprechen. Heimdall würde damit einen Durchmesser von mindestens 350 km besitzen.

Heimdall ist südöstlich, östlich und nordöstlich von Ejekta umgeben, die sich weit über 1000 km vom Zentrum ausdehnen. Niedriger aufgelöste SSI-Daten der Zielgebiete G2CSVGRGAP01 und 31CSJOVHEM01 verdeutlichen dies (Bild 8.13). Das helle Zentrum von Heimdall (in der oberen Aufnahme durch Sättigung des Sensors nicht gut erkennbar) ist bis zu einer Entfernung von etwa 600 bis 700 km vom Beckenzentrum von kontinuierlichen Ejekta umgeben (mit **Vhdc - Heimdall continuous ejecta material** in der Abbildung bezeichnet. Nach außen wird diese Formation durch helle Strahlen (Pfeile) und einzelne, meist helle Sekundärkrater (**Vhds - Heimdall secondary crater material**) abgelöst.

Der untere Teil der Abbildung 8.13 zeigt einen Ausschnitt eines (nicht kartenprojizierten) SSI-Bildes, das als einzige Aufnahme von Callisto während der 31. Umrundung um Jupiter aufgenommen wurde. Es war die letzte Aufnahme der SSI-Kamera von Callisto während der gesamten Galileo-Mission. Trotz der niedrigen Auflösung von nur 6.4 km/pxl sind wesentliche Details in Heimdall erstmals zu unterscheiden, die auf früheren Aufnahmen nicht zu sehen waren:

1. Die Aufnahme bildet das helle Zentrum (Einheit **Vhdp - Heimdall central bright plains**) gut erkennbar ab, umgeben von den kontinuierlichen Ejekta (*Vhdc*). Der Durchmesser der zentralen Ebenen beträgt etwa 300 bis 350 km.
2. Außerhalb dieser zentralen Einheit sind konzentrische Strukturen, Rücken oder nach innen gerichtete Steilhänge zu erkennen (angegeben durch **S**).
3. Eine "Ring"struktur ähnlich dem benachbarten Becken Lofn ist hier ebenfalls zu identifizieren. Wegen des nahen Terminators und der sehr niedrigen Auflösung ist aber nicht festzustellen, ob diese Struktur der in Lofn vorkommenden Einheit *Vlor* entspricht.
4. Die Kraterdichte in der Einheit *Vhdp* erscheint höher als in der vergleichbaren Einheit von Lofn (*Vlop*). Auffälligste Kraterformen sind zwei helle *BVc*-Krater, deren größerer etwa einen Durchmesser von 70 km aufweist, der kleinere der beiden ist ungefähr halb so groß. Am Nordrand der Einheit *Vhdp* befindet sich vermutlich ein ca. 180 km großer Krater

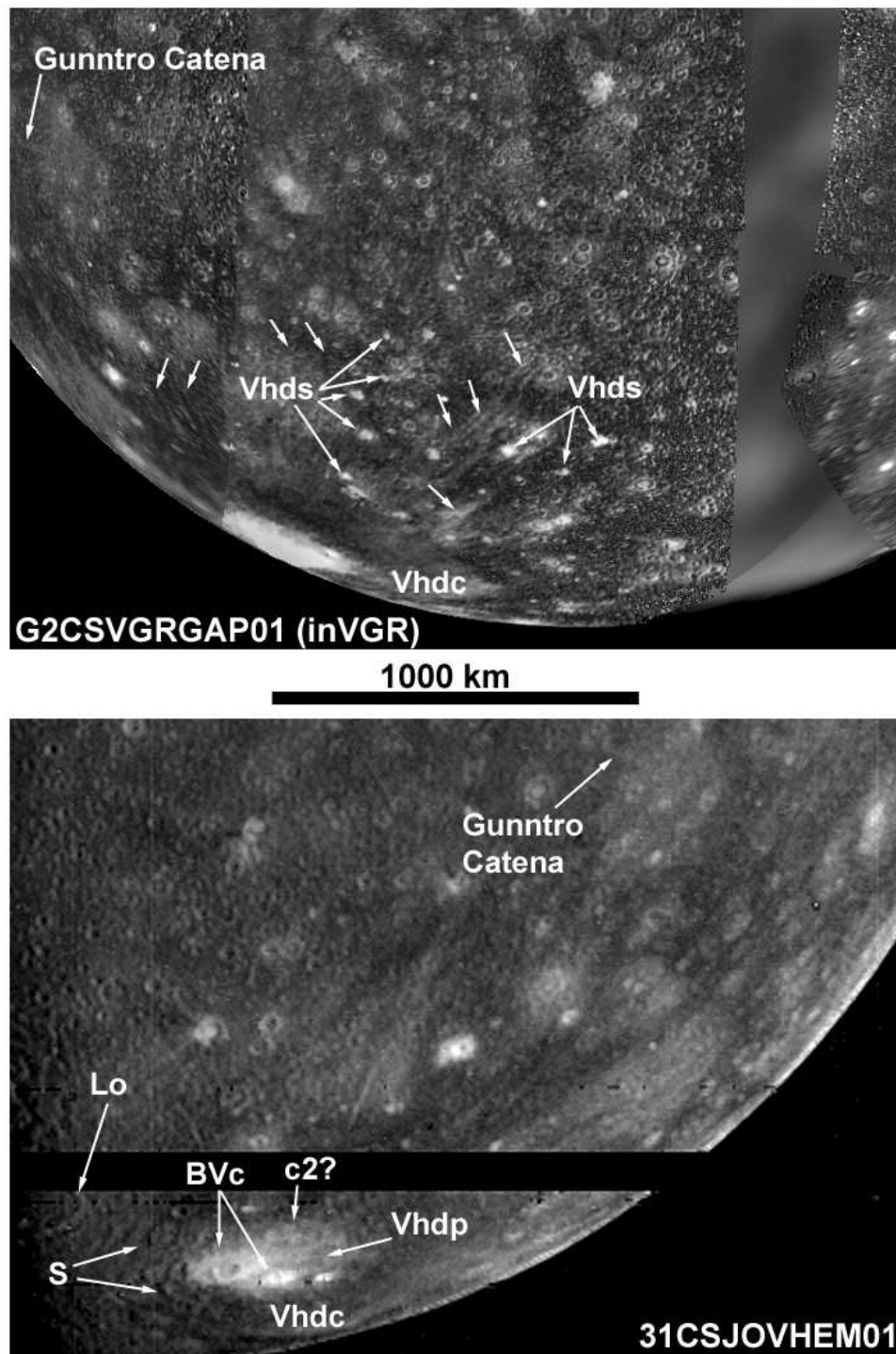


Abbildung 8.13.: Lofn und Heimdall in niedrig aufgelösten SSI-Daten. *Oben:* Zielgebiet G2CSVGRGAP01, Auflösung 4.3 km/pxl, Bildnummer G2C0005 in Voyager-1- (westlich) und Voyager-2-Kontext (östlich des SSI-Zielgebiets), orthographische Projektion. Die kontinuierlichen (*Vhdc*) und diskontinuierlichen Ejekta (*Vhds*) des Heimdall-(Proto-)beckens erstrecken sich über mehr als 1000 km. Der 270°-Meridian verläuft etwa entlang der Bildgrenze zu den niedrig aufgelösten Voyager-Daten. *Unten:* Zielgebiet 31CSJOVHEM01, Auflösung, 6.4 km/pxl (hier auf den doppelten Maßstab vergrößert), Bildnummer 31C0001. Nähere Erläuterungen im Text.

der lithostratigraphischen Einheit c_2 (in Abb. 8.13 mit $c_2?$ angegeben), der auf früheren Aufnahmen von Voyager und Galileo SSI nicht zu sehen war, in der I31-Aufnahme aber ebenfalls nur undeutlich erkennbar ist. Ob dies ein realer Krater ist, ist unklar. Werden die Bilddaten kartenprojiziert, bleibt dieser "Krater" elliptisch, während sich die hellen c_3 -Krater als Kreise abbilden. Es ist eher wahrscheinlich, dass sich Geländeformen hier zufällig in Kreisform anordnen und einen Krater vortäuschen.

8.3.3. Beginn und Dauer der späten Valhallischen Epoche

Durch die mit 875 m/pxl aufgelösten G8-Daten des Zielgebiets G8CSADLNDA01 kann der Lofn-Einschlag durch Messungen der Kraterhäufigkeiten genau datiert werden. In Bild 8.14 sind die kumulativen Verteilungen der Lofn-Formationen *Vlop* und *Vloc* der des Heimdall-Beckens (*Vhdu*) gegenübergestellt. Die Datierung von Heimdall mit Einschlagskratern stellt wegen der unzureichenden Abdeckung in den G8-Daten und der nicht genauen Zuordnung zu einer der Einheiten in Heimdall bestenfalls einen Versuch dar.

Gemessen wurde auf allen Formationen der Lofn-Gruppe. Einheiten mit bewegter Topographie wie *Vlor* oder *Vlom* ergaben dabei keine besonders aussagekräftigen Resultate. Dies gilt in ähnlicher Weise für die Einheit *Vlop*, da die Anzahl der sicher als Krater zu deutenden Formen sehr gering ist. Einige der in *Vlop* gemessenen Krater könnten auch als Sekundärkrater von einem der in Heimdall liegenden hellen c_3 -Krater stammen.

Die verlässlichste Messung zur Datierung des Lofn-Events wurde auf den kontinuierlichen Ejekta (*Vloc*) durchgeführt. Die kumulativen Häufigkeiten betragen $N_{\text{kum}}(\mathbf{D} \geq 1 \text{ km}) = 2.54 \pm 0.6 \cdot 10^{-3}$ bzw. bei $N_{\text{kum}}(\mathbf{D} \geq 10 \text{ km}) = 3.69 \pm 0.8 \cdot 10^{-5}$. Das daraus abgeleitete *Model-I*-Alter des Events beträgt $3.86 \pm 0.04 \text{ Ga}$.

Auch wenn es sich nur um einen einzigen Datenpunkt handelt, liefert das *Model-I*-Alter von Lofn - 3.86 Ga in der gleichen Größenordnung wie das auf 3.8 Ga festgelegte Alter von Gilgamesh - einen Hinweis darauf, dass Lofn und Gilgamesh wie das lunare Orientale-Becken den *marker horizon* für das Ende des LHB auf den beiden Satelliten darstellen. Dies ist, neben den Ähnlichkeiten in der Form der Kraterverteilungen, ein weiteres Argument für die Wahrscheinlichkeit einer mond-ähnlichen Impaktchronologie. Innerhalb dieses Modells beträgt die Dauer der jüngeren Valhallischen Epoche damit mindestens 350 - 450 Ma, falls für die Basis der nachfolgenden Burrianischen Periode ein Modellalter von 3.4 - 3.5 Ma angenommen wird (vergl. Abschnitt 8.2.8).

Nach *Model IIa* entstand Lofn dagegen vor nur 1.21 Ga (oberer/unterer Fehler: 3.58 Ga, 272 Ma). Die entsprechenden Werte für *Model IIb* betragen 2.61 Ga (oberer/unterer Fehler: 4.18 Ga, 1.12 Ga). Wie bereits erwähnt, weist Lofn keine ausgeprägte Beckenmorphologie auf, sondern wird von einigen Autoren als großer Krater mit einem hellen Strahlensystem in die Gruppe c_3 eingestuft (z. B. Greeley et al. 2001). Er stellt in diesem Chronologiemodell auch nicht den *marker horizon* dar, der das Ende des heftigen Meteoritenbombardements angibt, sondern entstand durch einen verhältnismäßig großen Einschlag in einer seit vermutlich mehr als 4 Ga bestehenden Phase konstanter Einschlagsrate. Im Rahmen von *Model IIa/IIb* empfiehlt es sich eher, Lofn als

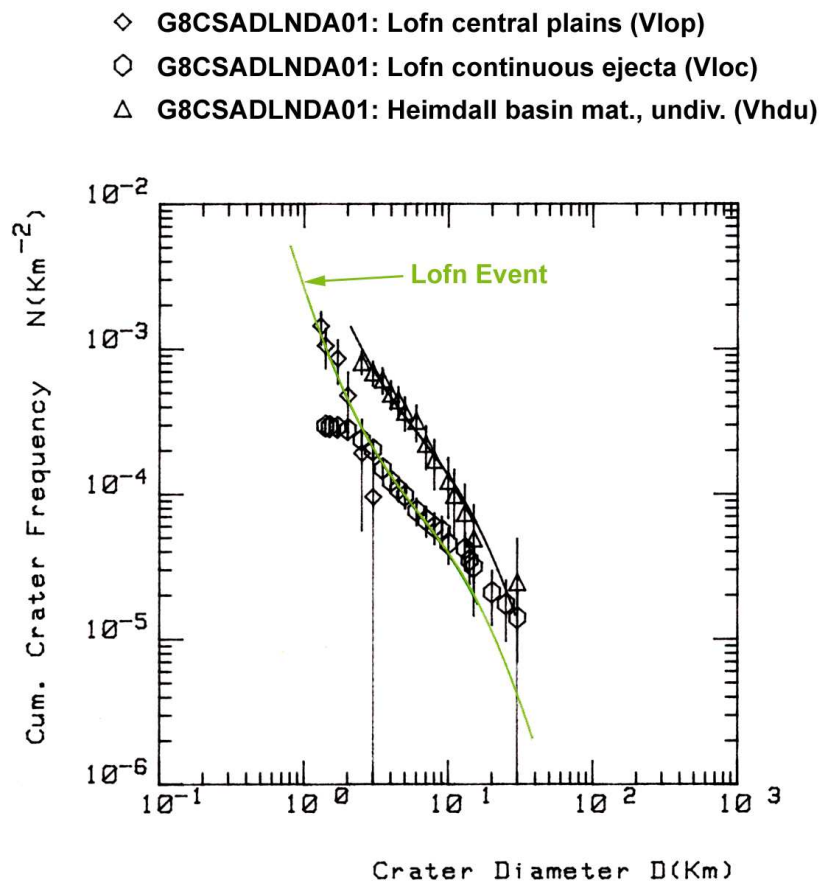


Abbildung 8.14.: Kumulative Häufigkeiten geologischer Einheiten der (Proto-)Becken Lofn und Heimdall. Das Diagramm zeigt die Häufigkeitsverteilungen in den zentralen Ebenen (Vlop) und in den kontinuierlichen Ejekta (Vloc) von Lofn sowie vom westlichen Rand des Heimdall-Beckens (Vhdu). Möglicherweise wurde hier noch auf den zentralen hellen Ebenen (Vhdp) gemessen.

Basis eines eigenen jüngsten chronostratigraphischen Systems (**Lofnian System**) zu wählen, dem auch die hellen Strahlenkrater wie Burr zuzuordnen sind.

8.3.4. Heimdall und Lofn: ein Doppelschlag ?

Der genaue zeitliche Zusammenhang zwischen den Heimdall- und Lofn-Events ist wegen ungenügender Bildabdeckung schwer festzulegen. Es sind zwei Alternativen möglich: (1) Heimdall und Lofn entstanden durch einen Doppelschlag, oder (2) Lofn entstand einige Zeit ($\gg 10$ Ma) nach Heimdall.

Die enge Nachbarschaft und Ähnlichkeiten in Albedo und Morphologie von Lofn und Heimdall legen einen Doppelschlag durch ein Projektil nahe, das sich bereits in einiger Entfernung von Callisto in zwei Bruchstücke zerlegte. Dass auf Callisto und Ganymed Einschläge von im Jupiter-

Gravitationsfeld zerbrochenen Projektilen stattgefunden haben, bezeugen eine ganze Reihe von Kraterketten (*Melosh und Schenk, 1993*). Der Einschlag der beiden Projektile erfolgte dann wahrscheinlich innerhalb weniger Stunden, zumindest waren die Auswurfsmassen von Heimdall weitgehend abgesetzt, bevor der Einschlag des Lofn-Projektils erfolgte. Die zweite Alternative sind zwei Einschläge in größerem zeitlichen Abstand, die zufällig in enger Nachbarschaft erfolgten.

Ein genauer Nachweis für eine der beiden Alternativen ist mit dem derzeit vorliegenden Bildmaterial nicht zu erbringen. Auf den SSI-Daten konnten zwar in der Einheit *Vhdu* Kraterhäufigkeiten gemessen werden, sie sind aber nicht sehr verlässlich, da nicht genau klar ist, ob wirklich innerhalb der Heimdall-Struktur gemessen wurde (vergl. kumulatives Diagramm in Bild 8.14). Das mit der im kumulativen Diagramm in Bild 8.14 dargestellten Verteilung bestimmte *Model I*-Alter beträgt $4.06 \pm 0.04 \text{ Ga}$, liegt also deutlich höher als bei Lofn. Die entsprechenden Alter für *Model IIa* sind 2.86 Ga (oberer/unterer Fehler: 4.53 Ga, 820 Ma), bzw. 4.26 Ga (4.56/2.72 Ga) für *Model IIb*. Ein Grund für die höheren Alterswerte könnte sein, dass Sekundärkrater von Lofn in der Einheit *Vhdu* mitgemessen wurden, möglicherweise auch Sekundärkrater von einem der hellen c_3 -Krater in Heimdall. Aus den höheren Alterswerten allein ergibt sich vorerst kein eindeutiger Nachweis zweier unterschiedlicher Einschlagsereignisse. Zumindest auf der Basis von Albedo und Morphologie kann Heimdall vorläufig zumindest in das Valhallische System mit einem Lofn wahrscheinlich vergleichbaren Alter eingegliedert werden.

Lofn und Heimdall sind etwa entlang einer nordwestlich-südöstlich verlaufenden Linie angeordnet. Diese Tatsache stellt einen Hinweis auf einen Doppeleinschlag zweier Projektile aus nordwestlicher Richtung dar, wie *Greeley et al. (2001)* zumindest für Lofn schlussfolgern. Ein Doppeleinschlag ließe sich dann in zukünftigen höher aufgelösten Bilddaten verifizieren, falls die Ejektaverteilung bei Heimdall ähnlich asymmetrisch wie bei Lofn ist und die in den kontinuierlichen Ejekta gemessenen Kraterhäufigkeiten innerhalb der Messfehler übereinstimmen. Allerdings muß für diesen Fall auch zu klären sein, ob sich beide Projektile dann noch einmal so weit zerlegt haben können, um unmittelbar hintereinander an der gleichen Stelle einzuschlagen, um die im Fall von Lofn zu beobachtende flache Topographie zu verursachen (*Greeley et al., 2001*).

8.4. Untere Serie des Valhallischen Systems

8.4.1. Typlokalität

Valhalla ist mit einem Durchmesser von etwa 3800 - 4000 km eines der größten bekannten Multiringbecken im Sonnensystem und bereits auf Bilddaten geringerer Auflösung als Ringstruktur erkennbar (*Schenk, 1995; Bender et al., 1997b; Greeley et al., 2000b*). Das Zentrum liegt mit 15° Nord und 55° West auf der in Richtung der Bahnbewegung gelegenen Hemisphäre von Callisto. Valhalla wurde durch die SSI-Kamera in unterschiedlichen Auflösungen aufgenommen. Bild 8.15 zeigt das Becken in den mit 410 bis 550 m/pxl aufgelösten Daten der Zielgebiete C9CSVALHAL01 und C9CSVALHAL02 im Kontext der mit 2 - 3 km/pxl aufgelösten Voyager-1-Daten.

Einige Typlokalitäten der wichtigsten morphologischen Zonen des Beckens wurden bereits bei der dritten Umkreisung (C3) der Galileo-Sonde um Jupiter durch die SSI-Kamera in sehr hoher Auflösung abgebildet (29 - 45 m/pxl). Die Lage dieser C3-Zielgebiete ist in Bild 8.15 eingezeichnet.

8.4.2. Geologie der Typlokalität

Schenk (1995) unterschied von innen nach außen drei strukturelle Zonen: (1) eine zentrale, helle, weitgehend glatte Zone (**Vcb** in den Abb. 8.15 und 8.16), sowie (2) eine innere (**Vir**, Abb. 8.15 und 8.16) und (3) eine äußere Zone (**Vog**, Abb. 8.15) mit jeweils charakteristischen tektonischen Strukturen. Lediglich *Vcb* entspricht dabei auch einer Materialeinheit. Auf den höher aufgelösten SSI-Daten des Zielgebiets C9CSVALHAL01 mit 410 m/pxl sind in jeder Zone weitere geologische Einheiten des Valhalla-Beckens zu identifizieren, die als Formationen zur **Valhalla Group** zusammengefasst werden können. In den Abbildungen 8.16 bis 8.19 sind sie im Detail dargestellt.

1. Central bright zone:

Das annähernd kreisförmige, etwa 600 km große Zentrum ist im Vergleich zum übrigen Becken und den umgebenden Kraterebenen relativ hell. *Schenk* (1995) bezeichnete diese Zone als zentrales "Palimpsest". Allerdings ist die Verwendung dieses Terms hier nicht richtig, da lediglich eine einzige strukturelle Zone einer größeren Impaktstruktur erfasst ist, während in Palimpsesten weitere Einheiten wie Böden, konzentrische Rücken, kontinuierliche und diskontinuierliche Ejekta zu unterscheiden sind (vergl. Abschnitt 5.4.5).

Das helle Zentrum von Valhalla ist in folgende Materialeinheiten unterteilbar:

Den flächenmäßig größten Raum nimmt die Einheit **Vcb - material of central bright plains** ein. Die Detailfarbaufnahme 8.16 zeigt eine helle, in der vorliegenden Auflösung glatte Oberfläche. Helle Flecken sind verbreitet, aber morphologisch und/oder geologisch nicht genau zu klassifizieren, da sich ihre Längserstreckung in der Größenordnung von nur wenig mehr als der Bildauflösung bewegt. Glatte, sehr dunkle Bereiche - **dark deposits (BVdd)** mit einigen Zehnerkilometern Ausdehnung kommen an einigen Stellen dieser

inneren Zone vor. Sie könnten mit Valhalla entstanden sein, aber auch erst in deutlich jüngerer Zeit (etwa in der Burrianischen Periode).

Die Krater gehören zwei Gruppen an: (a) hellen Kratern (**BVc**) mit deutlichen kontinuierlichen Ejekta, oftmals ausgeprägten Sekundärkraterketten (**cs**) und Kraterstrahlen, und (b) Kratern mit dunklen Ejekta oder dunklen Böden (**cd**). Letztere sind der Erosionsklasse c_2 (chronostratigraphisch *VAc*) zuzuordnen (siehe weiter unten Abschnitt 8.4.4).

Das helle Material des Valhalla-Zentrums überdeckt teilweise noch einige der inneren Ringe, die hier als Rücken (*ridges*) ausgebildet sind. Teilringe sind noch innerhalb der hellen Ebenen nachzuweisen, meist in kurzen Ringbögen (**Vr** oder **Vr?**).

2. Inner ridge and trough zone:

An das helle Zentrum schließt sich eine überwiegend von konzentrischen Rücken (*ridges*) und von etwa 20 km breiten Gräben geprägte dunklere Zone an, die sich bis zu einer Entfernung von ~ 950 km vom Beckenzentrum erstreckt. Die Form der Rücken ist asymmetrisch, die steilere Flanke zeigt nach außen (*Greeley et al.*, 2000b). Die Rücken (kartierbar als **concentric ridge material - Vr**) sind teilweise bis auf einzelne Massive (*knobs*) abgetragen. Dunkles Material kennzeichnet die Bereiche zwischen den einzelnen Rücken mit einigen isolierten helleren Flecken, vermutlich einzelne Hügel in der Größenordnung einiger Kilometer (nahe der Bildauflösungsgrenze).

Bei einem Durchmesser von ≈ 990 km liegt nach *Schenk et al.* (2004) der vermutliche nominelle Kratertrand. Er fällt mit einem der Rücken *Vr* zusammen. Die Lage dieses Randes (*Nominal Crater Rim: NCR*) ist in Bild 8.16 gestrichelt eingezeichnet. Der Rand bildet nicht die Grenze der strukturellen Zonen *Vcb/Vir*, sondern liegt bereits innerhalb *Vir*.

3. Outer graben zone:

Die äußere Grabenzone erstreckt sich bis zu einer Entfernung von mindestens 1900 km vom Beckenzentrum. Die Typlokalität dieser Zone und ihre geologischen Haupteinheiten befindet sich im Südosten des Beckens (Bild 8.17, oben). Die Grabenstrukturen, kartiert als **sinuous trough material - Vt**, sind hier im Durchschnitt 20 km breit. Zwei von ihnen durchschneiden ein prä-Valhallisches (unbenanntes) Palimpsest (**Ap**, zur Datierung siehe folgenden Abschnitt). Eine Reihe von meist sehr stark abgetragenen größeren Kratern werden zum Teil durch Gräben abgeschnitten, sind somit mindestens prä-Valhallisch, wegen des Abtragungszustandes eventuell auch wesentlich älter, d.h. prä-Asgardisch (**ApAc**). Etwa 1000 km vom Beckenzentrum entfernt sind Asgardisch-/prä-Asgardische Krater Ebenen mit ihrer hohen Kraterdichte zwischen den einzelnen Gräben erhalten geblieben (**ApAcp**. Radial zum Beckenzentrum verlaufen helle, schmale Bergrücken (**material of radial ridges - Vrr**, Pfeile). Sie treten im gesamten Valhalla-Becken auf, sind aber im südöstlichen Sektor besonders häufig.

Der Nordosten des Beckens wurde in den älteren Voyager-Daten als Zone nach außen gerichteter Steilhänge und glatter Ebenen (*scarp and smooth plains*), letztere vielleicht vulkanischen Ursprungs, interpretiert (*Remsberg*, 1981; *Bender et al.*, 1997b,a; *Homan et al.*, 1998). Die untere Detailaufnahme 8.17 zeigt dieses Gebiet, ebenso die Lage des höher aufgelösten Zielgebiets C3CSVALPLN01 (45 m/pxl). Die Daten in C9CSVALHAL01 bewiesen, dass hier stattdessen Grabenstrukturen (**sinuous graben material - Vg**)

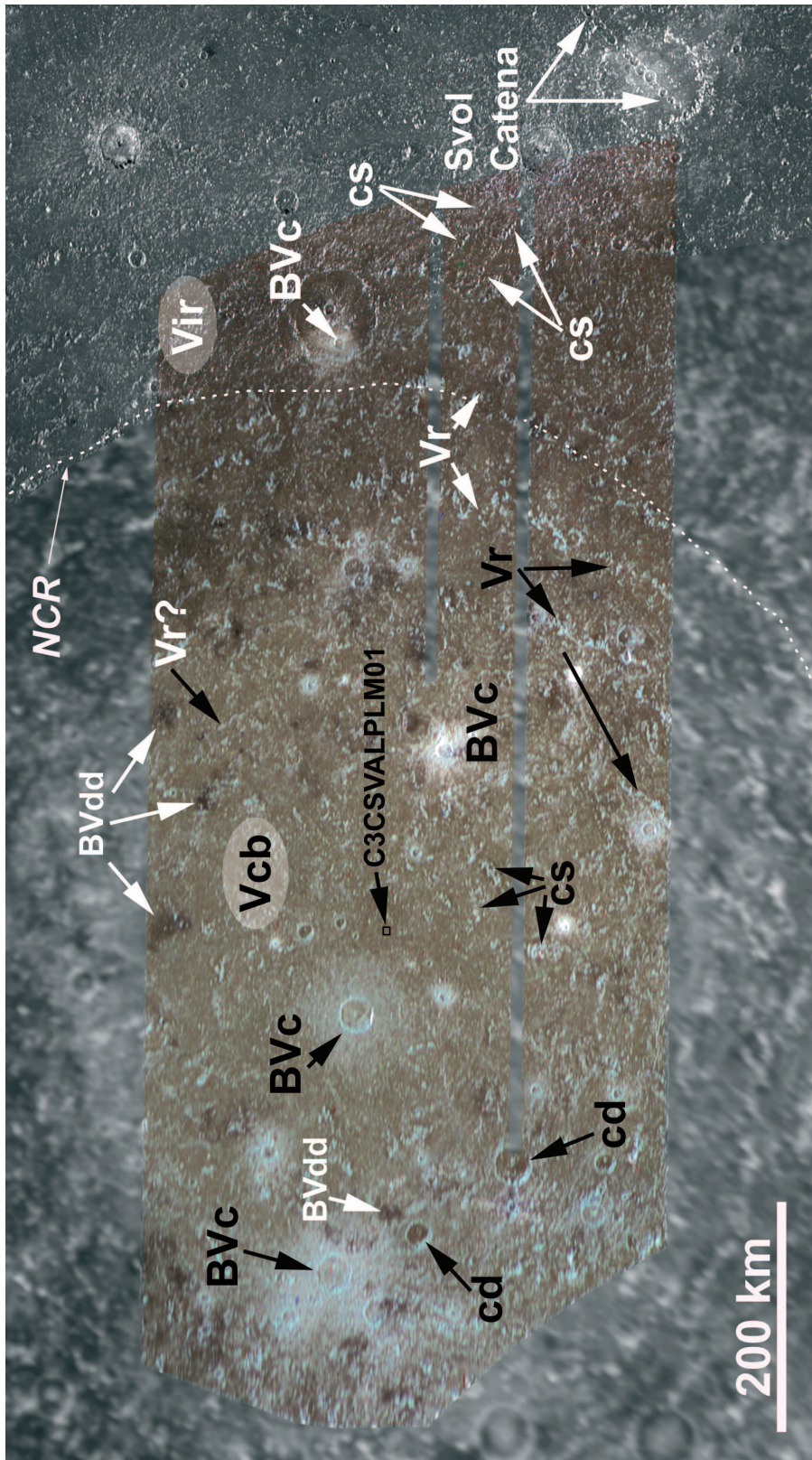


Abbildung 8.16.: Detailaufnahme des Valhalla-Beckenzenentrums. Farbmosaik aus Daten der Zielgebiete C9CSVALHAL01 bis 03 (jeweils 410 m/pxl, 550 m/pxl und 1.1 km/pxl) in den Filtern 968 nm, GRN und VLT (HSI-Transformation). Erfasst sind die strukturellen Zonen (*central bright zone* - *Vcb*) und der innere Bereich der *inner ridge and trough zone* - *Vir*; die gestrichelte Linie gibt den vermutlichen nominellen Kraterand (*NCR*) an (*Schenk et al.*, 2004); helle Krater (**BVc**) mit Sekundärkratern und -ketten (**cs**); Krater mit dunklen Ejekta und/oder dunklen Böden (**cd**); konzentrische Rücken (**Vr**); wahrscheinliche Lage des hoch aufgelösten SSI-Zielgebiets C3CSVALPLM01 (29 m/pxl). Weitere Erläuterungen siehe Text.

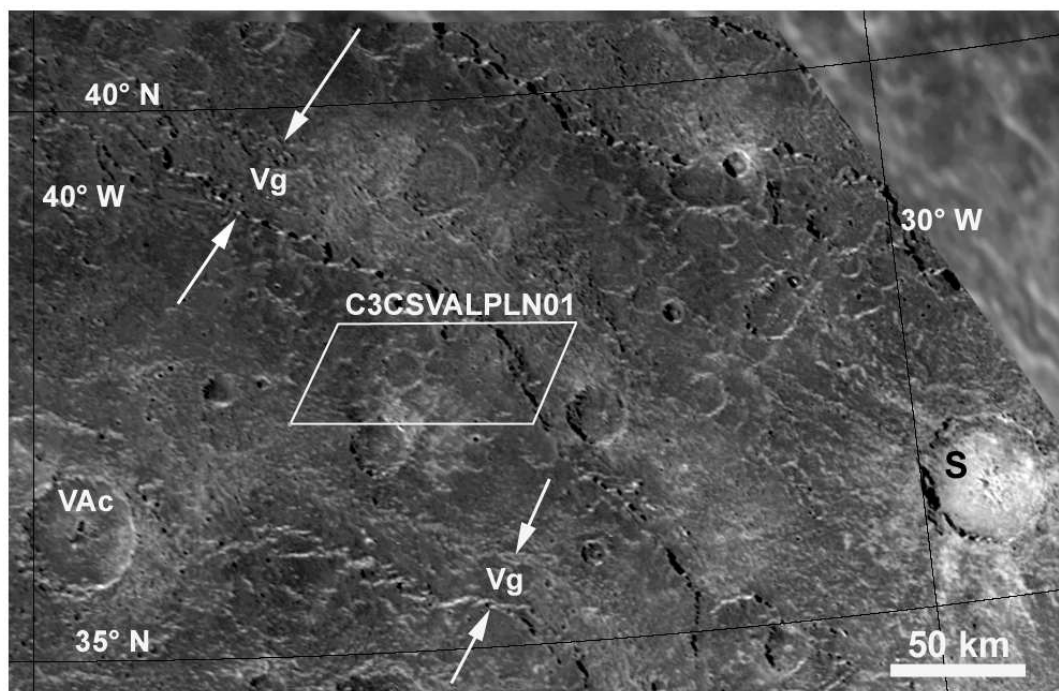
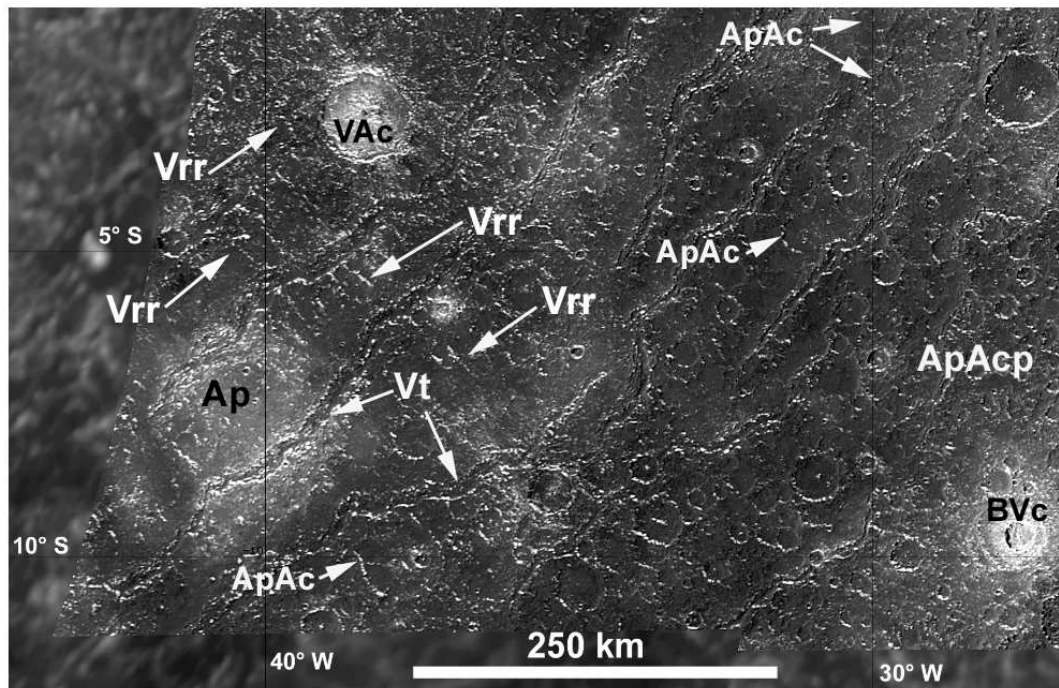


Abbildung 8.17.: Detailansichten der *outer graben zone* (*Vog*) des Valhalla-Beckens; die Lage beider Ansichten ist in Bild 8.15 (weiße Rechtecke) angegeben; *oben*: Detail des Südostbereichs des Beckens (Bildnummern C9C0025 - C9C0028), angezeigt sind ein Palimpsest (**Ap**), einige der Ringgräben (*troughs*, **Vt**), radiale Rücken (**Vrr**, Pfeile), ältere Krater (**ApAc**) und Kraterebenen (**ApAcp**); *unten*: Detail aus dem Nordosten des Beckens (Bildnummer C9C0016) mit Lage des Zielgebiets C3CSVALPLN01; Pfeile: gegenüberliegende Hänge von Ringgräben (**Vg**); **S**: Krater Sigyn.

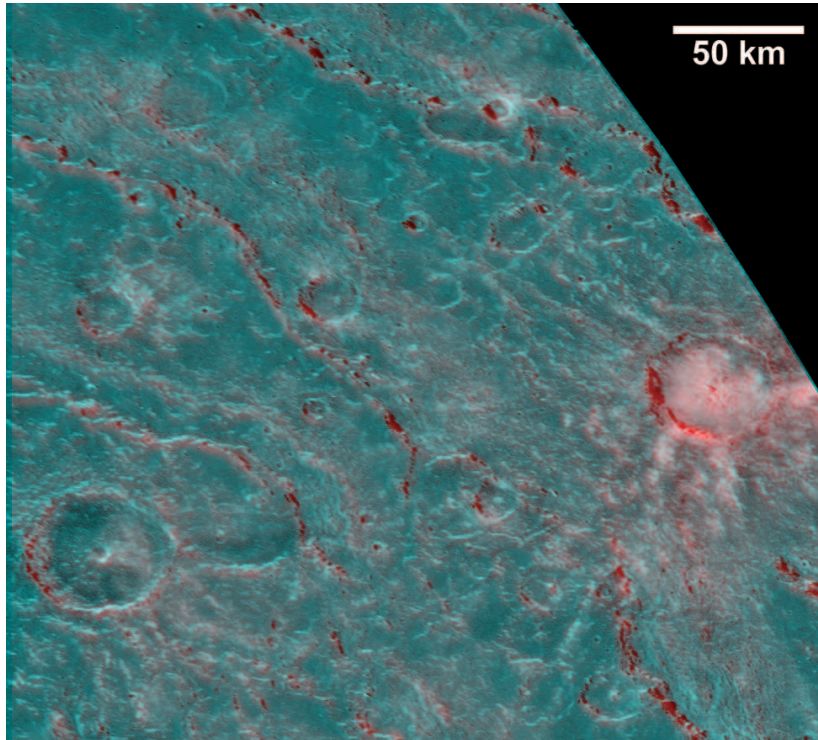


Abbildung 8.18.: Stereo-Anaglyphendarstellung der Nordostregion des Valhalla-Beckens aus Voyager-1- und SSI-Daten des Zielgebiets C9CSVALHAL01 (~ 2 km/pxl und 410 m/pxl). Die Lage des Anaglyphenbildes ist annähernd identisch mit der der Detailansicht 8.17 (unten).

vorhanden sind (Greeley *et al.*, 2000b). Ein aus den Voyager-1- und SSI-Daten erstelltes Anaglyphenbild verdeutlicht dies trotz des nicht sehr guten Stereoeindrucks⁵⁸.

Parallel zu den beiden gegenüber liegenden Grabenrändern verlaufen an vielen Stellen mehr oder weniger deutliche helle Bergrücken. Sie waren bereits in den Voyager-Daten zu identifizieren, die SSI-Daten zeigen sie deutlicher (Schenk, 1995; Homan *et al.*, 1998; Greeley *et al.*, 2000b). Sie kommen sowohl im Inneren der Gräben als auch außerhalb der Grabenränder vor, sind dort aber schwächer und meist nur in Form heller Albedolineamente erkennbar. Zwei bis drei solcher linearer Höhenzüge sind meist vorhanden. Einige der Stellen, an denen sie besonders ausgeprägt sind, zeigt Abb. 8.19. In den seltensten Fällen sind die Rücken zusammenhängend. Meist bestehen sie aus isolierten, wenige Kilometer oder Zehnerkilometer langen Hügeln oder Hügelketten.

Radiale Strukturen in Zusammenhang mit dem Valhalla-Becken fanden in der Literatur bisher ebenfalls keine oder kaum Erwähnung (McKinnon und Melosh, 1980; Remsberg, 1981; Passey und Shoemaker, 1982; Schenk, 1995; Greeley *et al.*, 2000b; Moore *et al.*, 2004; Schenk *et al.*, 2004). Vereinzelt sind aber radiale Strukturen, die nicht auf Sekundärkraterketten zurückzuführen sind, bereits in den Voyager-Daten erkennbar (Melosh, 1982). Die SSI-Daten C9CSVALHAL01 mit 410 m/pxl Auflösung zeigen diese Radialstrukturen

⁵⁸Der Versuch, auch eine Anaglyphendarstellung aus den C9CSVALHAL01-Daten und dem Zielgebiet C3CSVALPLN01 herzustellen, scheiterte, da keinerlei Stereoeindruck zustande kam.

deutlicher (vergl. Bild 8.17 (oben), **Vrr**, Pfeile). Bei dieser Einheit **radial ridge material - Vrr** handelt es sich um helle, lineare Erhebungen von wahrscheinlich nur wenigen Zehnermetern Höhe. Ihre Längenausdehnung beträgt wenige Kilometer bis Zehnerkilometer. Kürzere Exemplare könnten auch Reste alter, nicht mehr vollständig vorhandener Krater darstellen. Die meisten der linearen Rücken sind eindeutig radial auf das Zentrum des Valhalla-Beckens ausgerichtet.

4. Kraterketten:

Eine Reihe markanter, bis zu mehrere hundert Kilometer langer Kraterketten befinden sich innerhalb und in der Umgebung des Valhalla-Beckens (Bild 8.15). Zwei dieser Ketten, *Fimbuthul Catena* (*FC* in Bild 8.15, (etwa 287 km Länge) und *Eikin Catena* (*EC*, 223 km Länge), verlaufen radial zum Valhallazentrum. Die beiden Ketten *Svol* und *Gomul Catena* (je 161 km und 343 km Länge, *SC* und *GC* in Bild 8.15) sind jedoch in Richtung zum Zentrum beliebig orientiert und überdecken Valhalla-Ringstrukturen.

Die äußersten Ringe von Valhalla und Asgard, dem zweitgrößten Becken auf Callisto, befinden sich in einem Abstand von mindestens 1000 km voneinander. Direkte stratigraphische Untersuchungen ihrer relativen Alter durch gegenseitige Überdeckung sind daher nicht möglich. Das Alter beider Becken lässt sich nur über Kraterhäufigkeiten bestimmen.

8.4.3. Beginn und Dauer der Frühen Valhallischen Epoche

Der Valhalla-Impaktevent ist durch die kumulative Kraterhäufigkeit der *central bright plains* (*Vcb*) festgelegt (Bild 8.20 (a)). Die Messungen in den SSI-Daten (Zielgebiet C9CSVALHAL02, 550 m/pxl, vergl. Bild 8.16) bestätigten ältere Messungen in den Voyager-1-Daten (in der Abbildung nicht gezeigt), die aber wegen der deutlich schlechteren Auflösung statistisch wenig gesichert waren (*Wagner und Neukum*, 1994b).

Der kumulativen Häufigkeit $N_{\text{cum}}(D \geq 1 \text{ km}) = 5.46 \pm 1.67 \cdot 10^{-3}$ bzw. von $N_{\text{cum}}(D \geq 10 \text{ km}) = 7.85 \pm 2.4 \cdot 10^{-5}$ entspricht ein *Model-I*-Alter von $3.98 \pm 0.04 \text{ Ga}$. Dieser Wert stimmt recht gut mit dem Alter von 3.96 Ga überein, das *Passey und Shoemaker* (1982) aus ihrem älteren Chronologiemodell mit mond-ähnlicher Einschlagsrate erhielten. Das entsprechende *Model-IIa*-Alter liegt bei 2.15 Ga (oberer/unterer Fehler: 4.37 Ga, 550 Ma) (*Model IIb*: 3.77 Ga (4.54 Ga, 2.02 Ga)).

Das kumulative Häufigkeitsdiagramm in Bild 8.20 (b) zeigt weitere Messungen aus der äußeren Grabenzone (vergl. Bild 8.17, oben) und der Kraterebenen östlich von Valhalla. Die Isochronen des Valhalla- und des älteren Asgard-Events sind eingezeichnet. Die Zählung für ein unbenanntes Palimpsest (**Ap** in Abb. 8.17, oben) ergab ein entsprechend der Stratigraphie klar Asgardisches *Model-I*-Alter von $4.12 \pm 0.05 \text{ Ga}$. Für die Modellvarianten *IIa/IIb* resultieren Werte von 3.65 Ga (4.56 Ga, 1.26 Ga) bzw. von 4.51 Ga (4.56 Ga, 3.53 Ga). Weitere Einzelkrater ließen sich aber nicht datieren.

Passey (1982) und *Passey und Shoemaker* (1982) erwähnten einen graduellen Übergang in der Kraterhäufigkeit von innen nach außen als Folge viskoser Relaxationsprozesse. Die hier bestimm-

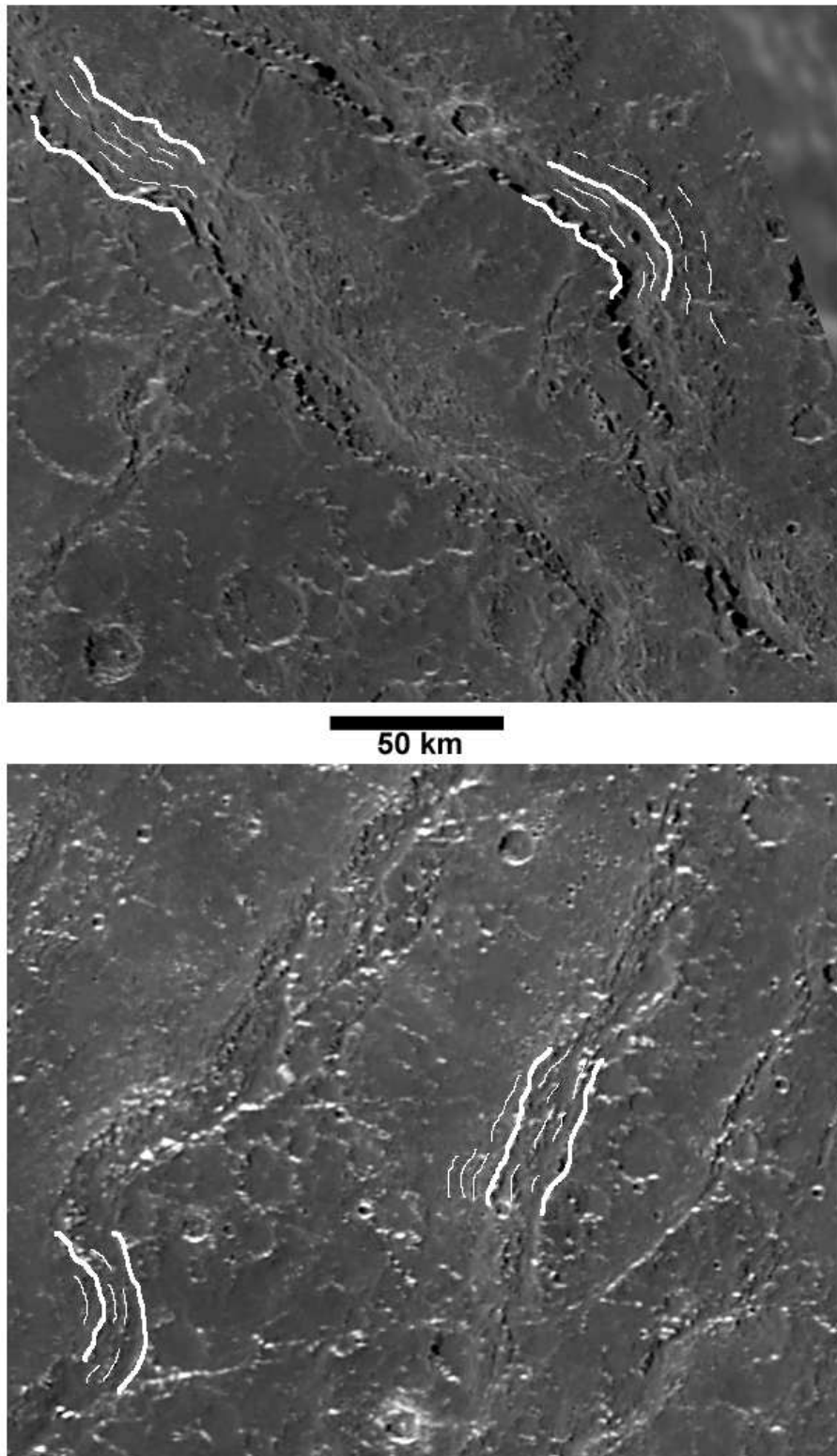


Abbildung 8.19.: Detailansichten der *outer graben zone* (*Vog*): zu den Grabenrändern parallele Bergrücken. An einigen Stellen sind die eigentlichen Grabenränder mit größerer Liniendicke, die parallelen Bergrücken und Lineamente mit geringerer Liniendicke angegeben. Lage der beiden Detailansichten in Bild 8.15 schwarz eingezeichnet.

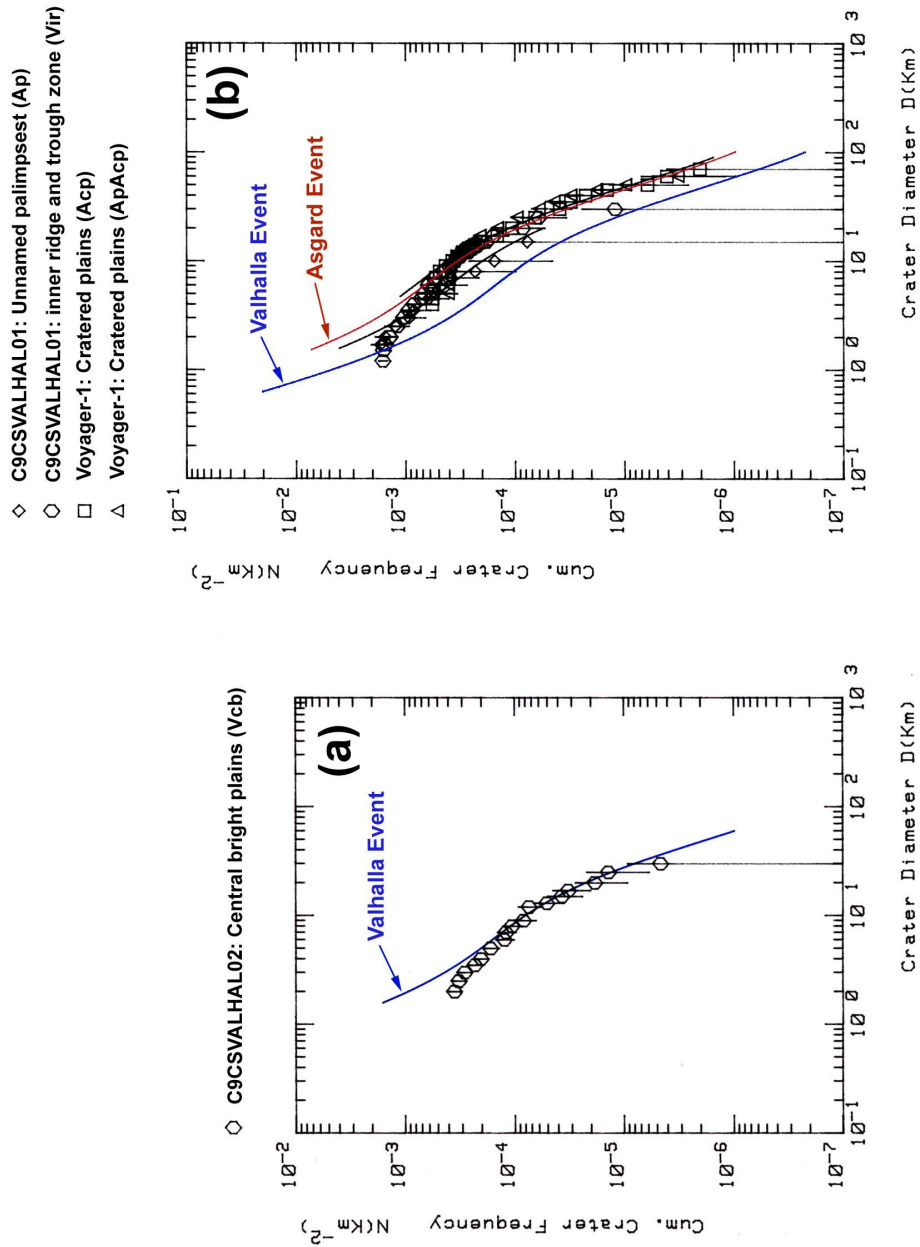


Abbildung 8.20.: Kumulative Kraterhäufigkeiten geologischer Einheiten im Valhalla-Becken; (a) *central bright plains (Vcb)*, gemessen in SSI-Daten des Zielgebiets C9CSVALHAL02 (550 m/pxl), durch diese Messung wird der Valhalla-Event (Einschlagsalter) datiert; (b) kumulative Häufigkeiten, gemessen in der äußeren Grabenzone, und auf einem durch Grabenstrukturen durchschnittenen Palimpsest (Messungen aus der in Abb. 8.17 (oben) gezeigten Region). Die blaue Kurve zeigt den Valhalla-Event, die rote den älteren Asgard-Event an.

ten Kraterhäufigkeiten bestätigen dies nicht. Die prä-Valhallischen Krater wurden außerhalb des nominellen Kraterrandes zum Großteil zerstört oder überdeckt, sind aber noch erkennbar. Die im inneren Bereich der strukturellen Einheit *Vog* in den Kraterebenen (**ApAcp** in Abb. 8.17, oben) gemessenen Kraterhäufigkeiten entsprechen daher bereits etwa der der Kraterebenen Asgardischen bzw. prä-Asgardischen Alters. Grund für das außerhalb des mutmaßlichen Kraterrandes von 990 km Durchmesser (*Moore et al.*, 2004; *Schenk et al.*, 2004) vergleichsweise hohe Alter von 4.2 ± 0.03 Ga (*Model I* (entspricht Altern nach *Modell IIa/IIb* von 4.3 Ga (4.56 Ga, 1.99 Ga) bzw. 4.56 Ga (4.56 Ga, 4.23 Ga)) liegt an einer relativ großen Zahl stark abgetragener prä-Valhallischer Krater, die alle noch erkannt und mitgemessen werden konnten. Diese Krater waren in den Voyager-Daten nicht zu sehen. In Abb. 8.17 (oben) sind einige dieser alten abgetragenen Krater (**ApAc**) angezeigt.

Die Frühe Valhallische Epoche war innerhalb von *Model I* in ihrer Dauer von 120 Ma fast doppelt so lang wie die lunare Frühe Imbrische Epoche (70 Ma). Innerhalb von *Model IIa/IIb* dagegen sind die beiden Impaktereignisse Valhalla und Lofn durch eine beträchtliche Zeitspanne von mehr als 1 Ga voneinander getrennt. Andererseits vertraten *Zahnle et al.* (2003) sogar ein gleiches Alter für Valhalla und Lofn wegen ihrer geographischen Lage und möglicher Apex-Antapex-Abhängigkeiten der Kraterate. An anderer Stelle (in Abschnitt 8.6.5) wird diskutiert, dass es für derartige Abhängigkeiten der Kraterate keinerlei Anzeichen gibt.

8.4.4. Weitere Typlokalitäten geologischer Einheiten des Valhallischen Systems

Die lithostratigraphische Gruppe c_2 umfasst Krater, die durch teilweise erodierte Ejekta und teils noch frische, teils abgetragene Kraterränder charakterisiert sind. Die Einheiten des Valhalla-Beckens stellen Basishorizonte dieser Krater dar, da diese Krater sowohl die zentralen hellen Ebenen überlagern, z. B. Krater mit dunklem Boden (**cd** in Abb. 8.16), oder sie überdecken Rücken oder Grabenstrukturen des Beckens (Beispiele: **VAc** in Abb. 8.17). Daneben sind sie aber auch innerhalb der Einheiten des älteren Asgard-Beckens verbreitet. Krater der Erosionsklasse c_2 entsprechen damit einer chronostratigraphischen Einheit **VAc** mit beiden Becken als möglicher Basis. Einzeldatierungen von Kratern dieses Typs mit eindeutiger Zuordnung zum Valhallischen oder Asgardischen System waren mangels ausreichender Bildauflösung nur in einer sehr begrenzten Zahl von Fällen (Beispiel: Krater Tindr; vergl. späteren Abschnitt 8.5.6) möglich.

Typlokalitäten dieser Kratereinheit sind in Bild 8.21 dargestellt. Der im linken Detailbild gezeigte unbenannte Krater bei 21.6° S Breite und 196.3° W Länge aus dem SSI-Zielgebiet 30CSBRAN-CR.01 weist die typischen Eigenschaften dieser Einheit auf. Kontinuierliche Ejekta sind noch zum Großteil vorhanden und durch ihre höhere Albedo deutlich von den umgebenden dunklen Kraterebenen abgegrenzt. Der Kraterrand ist weitgehend scharf. Der unmittelbar am rechten oberen Kraterrand gelegen kleinere Krater ist durch ähnliche Morphologie einschließlich einer Zentralmulde, charakterisiert. Es könnte sich um den gleichzeitigen Einschlag zweier Projektilen gehandelt haben.

Die Beispiele aus dem rechten Detailbild (angezeigt durch Pfeile) stammen vom Zielgebiet G8CSSPOLAR01. Die Krater sind in unmittelbarer Nähe des Südpols gelegen. Durch den nied-

rigen Sonnenstand treten die Kraterränder schärfer hervor, während die hellen Ejekta und Kraterböden weniger in Erscheinung treten.

Eine ähnliche chronostratigraphische Einheit teils frischer, teils bereits stärker abgetragener Dom-Krater oder Penepalimpseste lässt sich als Einheit **VAd** analog zur Einheit *VAc* der regulären Krater aufstellen. Beispiele zeigt Bild 8.21. Der Kraterrand des Penepalimpsests Barri (linkes Detailbild) ist nur in einzelnen konzentrischen Massiven oder Ringbögen nachweisbar (**r**). Der stark zergliederte Rand der Zentralmulde erscheint im östlichen Bereich stärker abgetragen, ebenso die hellen kontinuierlichen Ejekta. Barri weist starke Ähnlichkeiten mit dem Penepalimpsest Neith auf Ganymed auf (vergl. *Wagner et al.*, 1998b).

Barri liegt im SSI-Zielgebiet G8CSVGRGAP01 (980 m/pxl), ebenso wie das Penepalimpsest Jalkr (rechtes Detailbild). Beide Formen wurden bereits in Abschnitt 5.4.5, Bild 5.7 (g, f) kurz eingeführt. Vermutlich repräsentieren die vereinzelt konzentrischen Massive außerhalb des zergliederten "Kraterrandes" den eigentlichen Kraterrand (**r?**, Pfeile), die innere zergliederte Ringstruktur dagegen eine Zentralmulde, wiederum analog zu Neith. Ein nach Jalkr entstandener Krater mit etwa 25 km Durchmesser verteilte dunkleres Material aus nicht zu großer Tiefe auf den hellen, eisreicheren Einheiten von Jalkr.

Jalkr konnte durch Einschlagskraterhäufigkeiten datiert werden, aufgrund der geringen Bildauflösung jedoch nur durch eine geringe Zahl von Kratern mit wenig gesicherter Statistik (*Wagner et al.*, 1999). Das *Model-I*-Alter von 3.96 ± 0.1 Ga rechtfertigt die Zuordnung der Jalkr-Impaktstruktur zur Einheit *VAd*.

Palimpseste sind Einschlagsstrukturen, die nur auf den beiden Jupitersatelliten Ganymed und Callisto vorkommen (vergl. Einführung in Abschnitt 5.4.5). Die auf Callisto verbreiteten Palimpseste sind meist stark abgetragen oder überdeckt und deshalb schwer als solche erkennbar. Ganymed zeichnet sich durch eine große Zahl von Palimpsesten, namentlich im dunklen Gebiet, aus, während sie auf Callisto nach Ansicht von z. B. *Passey und Shoemaker* (1982) und *Schenk et al.* (2004) weit weniger verbreitet sind.

Eines der am besten erhaltenen Palimpseste auf Callisto ist die bereits im früheren Abschnitt 5.4.5, Abb. 5.7 (k) gezeigte Impaktstruktur Kol Facula im SSI-Zielgebiet G2CSVGRGAP01 (4.3 km/pxl). Bild 8.21 stellt dieses Palimpsest im Detail dar. Palimpseste werden ähnlich wie Krater in 2 - 3 Erosionsklassen eingeteilt (*Lucchitta et al.*, 1992). Der lithostratigraphischen Einheit p_2 entspricht hier die chronostratigraphische Einheit **VAp**.

Das in Bild 8.21 dargestellte Palimpsest der Einheit *VAp* ist eindeutig als Impaktstruktur zu klassifizieren. Reste einer inneren Ringstruktur, mit **r** (und Pfeilen) gekennzeichnet, entsprechen vermutlich dem Kraterrand. An der Grenze des annähernd kreisförmigen hellen Flecks mit einem Durchmesser von etwa 300 km, dessen äußere Grenze zu den umgebenden dunklen Kraterebenen dem äußeren Rand der kontinuierlichen Ejekta entspricht, treten langgezogene, mehrere 100 km lange Furchen auf, die durch ausgeworfenes Material hervorgerufen wurden, das über eine größere Strecke über die Oberfläche schrammte.

Kol Facula konnte durch Einschlagskraterhäufigkeiten datiert werden, allerdings wiederum statistisch nicht sehr gut abgesichert wegen der niedrigen Bildauflösung des Zielgebiets G2CSVGR-

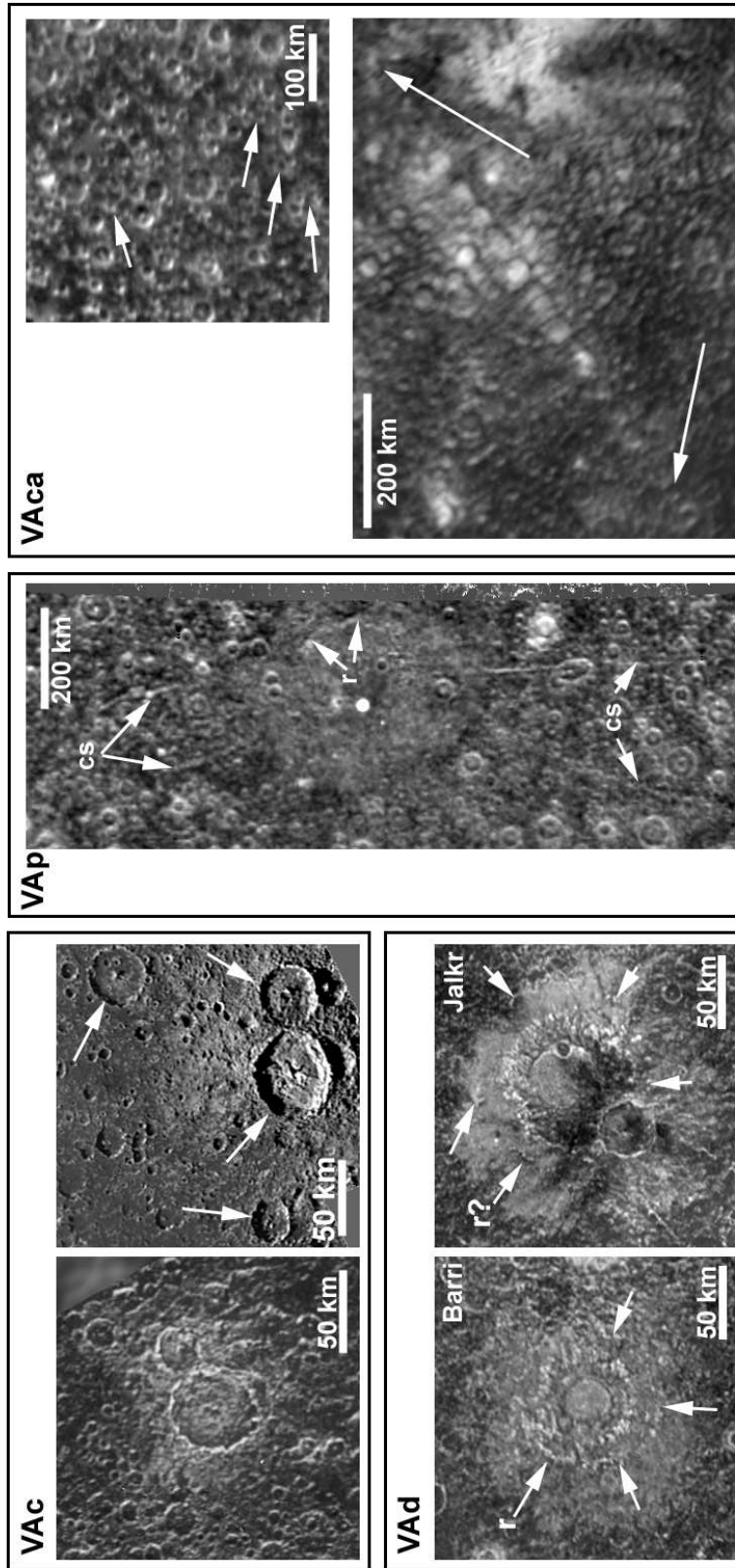


Abbildung 8.21.: Weitere Typlokalitäten geologischer Einheiten des Valhallischen Systems. **VAc:** Zielgebiete 30CSBRANCR_01, Bildnummer 30C0024 (links), und G8CSSPOLAR01, Bildnummer G8C0019 (rechts), beide ca. 700 m/pxl; **VAd:** Zielgebiet G8CSVGRGAP01 (980 m/pxl), G8C0002 (links), G8C0004 und G8C0007 (rechts); **VAp:** Mosaik aus Daten von Voyager-2 (oben, ca. 2 km/pxl) und Voyager-1 (unten, ca. 3 km/pxl) Siehe Text für weitere Erläuterungen.

GAP01 (4.3 km/pxl). Das *Model-I*-Alter beträgt 3.98 ± 0.1 Ga. Dieses Alter stimmt ziemlich genau mit dem Alter des Valhalla-Beckens überein. Ein weiteres, mit etwa 600 km Durchmesser noch größeres Palimpsest, Utgard (siehe Abb. 8.3 in Abschnitt 8.2.2), liegt auf dem älteren Asgard-Becken. Beide Palimpseste sind relativ gut erhalten. Die Aufstellung der chronostratigraphischen Palimpesteinheit **VAp** auf der Grundlage der Eigenschaften beider Palimpseste ist somit gut zu begründen.

Neben den in Abschnitt 8.2.4 bereits genannten Kraterketten weist die Callisto-Oberfläche in regionalem Maßstab an einigen Stellen auffallende Cluster von Krater mit Durchmessern mehrerer Kilometer bis etwa 10 km auf, die nicht eindeutig auf eine größere Impaktstruktur (etwa ein Becken) zu beziehen sind und demzufolge nicht Ketten großer Sekundärkrater darstellen. Ihre Ränder sind meist noch scharf und teilweise hell, sie ähneln somit c_2 -Kratern. Mit den auf der Apex-Hemisphäre Callisto's weit verbreiteten Kraterketten gleichen Erosionszustandes können sie zu einer chronostratigraphischen Einheit **VAc** zusammengefasst werden.

Beispiele für Kratercluster und lineare Kraterketten der Einheit *VAc* zeigt Abb. 8.21. Die von Voyager-2 aufgenommenen Cluster (oberes Detailbild; Pfeile; Bildauflösung ca. 2 km/pxl) liegen etwa bei 15° N, 251° W. Die im unteren Detailbild in Voyager-1-Aufnahmen (ca. 3 km/pxl) dargestellte Kette *Gipul Catena* liegt nördlich der am weitesten noch nach Norden reichenden Ringgräben von Valhalla (zentriert etwa bei 70° N, 49° W). Die Pfeile zeigen auf den ersten und letzten Einzelkrater der mit ca. 700 km Länge größten Kraterkette auf Callisto. Die niedrige Bildauflösung und die leicht unscharfen Bilddaten verhindern eine eindeutige stratigraphische Zuordnung. Die Einzelkrater sind noch relativ gut erhalten, *Gipul Catena* könnte demnach noch in die Einheit *VAc* gestellt werden.

In den folgenden Abschnitten 8.4.5 bis 8.4.8 werden die geologischen Einheiten, Alter und Prozesse der vier hoch aufgelösten Zielgebiete im Valhalla-Becken diskutiert. Wie Bild 8.15 dokumentiert, nehmen die in hoher Auflösung aufgenommenen Zielgebiete im Bereich des Valhalla-Beckens nur eine verschwindend geringe Fläche ein. Dies erschwert geologische Interpretationen ebenso wie genaue Messungen der Kraterhäufigkeiten über einen größeren Bereich. Zusätzliche Hindernisse sind (a) der mit einem Faktor von 10 und mehr hohe Unterschied in der Auflösung zwischen den C3-Zielgebieten und dem C9-Kontext und (b) der unterschiedliche Sonnenstand zwischen den C3- und den C9-Daten. Bei zwei Zielgebieten war die genaue Lage im C9-Kontext nur sehr ungenau anzugeben.

8.4.5. Zielgebiet: Valhalla Plains Material (C3CSVALPLM01)

Lediglich ein einzelnes SSI-Bild wurde während der dritten Umkreisung vom Gebiet der hellen zentralen Ebenen des Valhalla-Beckens aufgenommen⁵⁹. Der Auflösungsunterschied zwischen diesem Zielgebiet C3CSVALPLM01 mit 29 m/pxl und der späteren Aufnahme der zentralen Ebenen (Zielgebiet C9CSVALHAL02, 550 m/pxl) beträgt etwa einen Faktor 20.

⁵⁹Stark eingeschränkte Verfügbarkeit von Downlink prägte den dritten Galileo-Orbit C3. Die Anzahl der Einzelbilder pro Zielgebiet war sehr begrenzt. In einem Fall musste sogar eine bereits aufgenommene Bildsequenz aus einer von Voyager schlecht abgedeckten Oberflächenregion (SSI-Zielgebiet C3CSVGRGAP01, 3.4 km/pxl)

CALLISTO: SSI target area C3CSVALPLM01 (30 m/pxl)

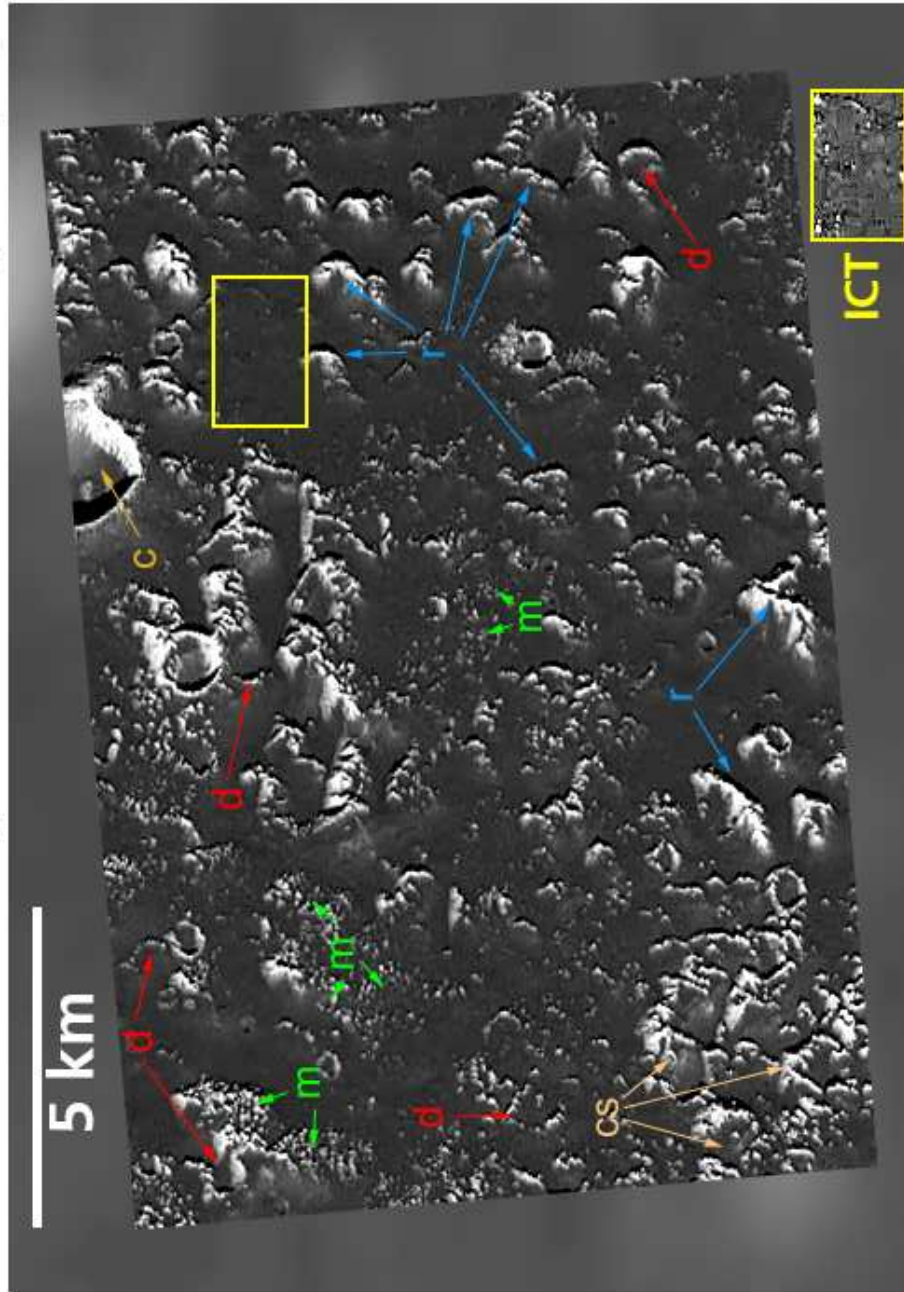


Abbildung 8.22.: Detailaufnahme der zentralen hellen Ebenen von Valhalla in hoher Auflösung. SSI-Bild C3C0030 des Zielgebiets C3CSVALPLM01 (30 m/pxl) in Mercator-Projektion. Die genaue Lage (Bildzentrum) im niedriger aufgelösten Kontextbild C9C0030 (GRN-Filter) des Zielgebiets C9CSVALHAL02 (550 m/pxl) befindet sich vermutlich bei 15° Nord und 54° West. Das Gebiet wurde aus relativ schrägem Blickwinkel aufgenommen (horizontaler Bildmaßstab 45 m/pxl gegenüber einem vertikalen von 29 m/pxl). Nähere Erläuterung der Symbole im Text.

Eine Mercator-kartenprojizierte Version der einzelnen, aus relativ schrägem Blickwinkel aufgenommenen C3-Aufnahme (Bildnummer C3C0030) zeigt Bild 8.22. Wegen des hohen Auflösungsunterschiedes war die exakte Lage des C3-Zielgebiets im Kontext der C9-Daten nicht zu ermitteln.

Das in der Abbildung dargestellte Gebiet ist geprägt durch hohe Albedokontraste. Helles Material ist in Kraterrändern, Gruppen von Massiven und Bergrücken konzentriert, die wie Inseln in einer glatten, dunklen Einheit "schwimmen" bzw. von diesem dunklen Material teilweise überdeckt werden. Die Kraterdichte innerhalb dieser Einheit erscheint auffallend gering. Es wurde nach ersten Sichtungen der hoch aufgelösten Callisto-C3-Daten vermutet, die niedrige Kraterdichte sei auf eine geringere Anzahl kleinerer Projektile zurückzuführen (vergl. *Chapman et al.*, 1997, und *Chapman et al.*, 1998).

Die Aufnahme wurde mit einem Faktor von etwa 3.2 ICT-komprimiert. Dadurch treten Artefakte auf, die sich bei Kontrast- und Kantenverstärkung durch etwa 4x4 bis 5x5 Pixel große Boxen bemerkbar machen. Flächen, in denen sie auffallend vorhanden sind, wurden in der Abbildung durch **ICT** gekennzeichnet. Ein derartiger Bereich wurde herauskopiert und extrem stark gefiltert (gelb umrandet unten rechts im Bild), um das Schachbrettmuster zu verdeutlichen. Kleinere Strukturen, wie z.B. Krater um 100 bis 150 m Durchmesser sind deshalb teilweise nicht mehr zu erkennen, vor allem in den dunklen, relativ glatten Bereichen, die verhältnismäßig stark komprimiert wurden.

Die hellen, mehr oder weniger deutlich kreisförmigen Strukturen sind vermutlich stark abgetragene Krater (Beispiele: **d** in Bild 8.22). Eine Unterscheidung zwischen Primär- oder Sekundärkratern ist wegen der starken Abtragung nicht mehr zu treffen, außer vielleicht bei einer Gruppe abgetragener Krater im linken unteren Bildteil (**cs**). Der Ursprungskrater ist unbekannt, da kein Kontext vorhanden ist.

Einige Gruppen von Massiven (**m**) stellen entweder Reste von Ejekta älterer, ebenfalls stark abgetragener Krater dar, oder kennzeichnen die eishaltige, nicht vollständig von dunklem Material überdeckte Oberfläche, die wahrscheinlich aus Impaktschmelze beim Einschlag des Valhalla-Projektils entstand (vergl. *Schenk*, 1995). Die linearen Bergrücken (**r**) sind im Mittel 500 bis 1500 m lang und nach Schattenmessungen bis zu 100 m hoch. Sie erscheinen innerhalb des abgebildeten Gebiets einheitlich etwa nach NE-SW ausgerichtet. Da sich das Zielgebiet noch innerhalb des nominellen Kraters von Valhalla befindet, handelt es sich bei diesen Rücken wahrscheinlich um Reste eines ehemaligen Ringes innerhalb des Zentralkraters. Ob sich die Ausrichtung dieser Massive konzentrisch um das Zentrum Valhallas anordnet, kann wegen der zu kleinen erfassten Fläche nicht beantwortet werden.

Wegen der teilweise stark abgetragenen Kraterränder, der hohen Datenkompression und des fehlenden Kontexts sind Messung und Interpretation der Kraterhäufigkeit dieses Gebiets problematisch. Bild 8.23 zeigt das kumulative Häufigkeitsdiagramm des Gebiets, gemessen von zwei Auswertern, die ansonsten in anderen Gebieten, auch auf Bildern weitaus geringerer Auflösung, sehr genau übereinstimmen. In beiden Messungen liegen die kleinsten, noch messbaren Krater etwa bei Durchmessern von etwa 90 bis 100 m. Zwischen 100 und 300 m verläuft die Verteilung

auf dem Tape-Recorder bleiben, da kein Downlink für die Übermittlung zur Erde zur Verfügung stand.

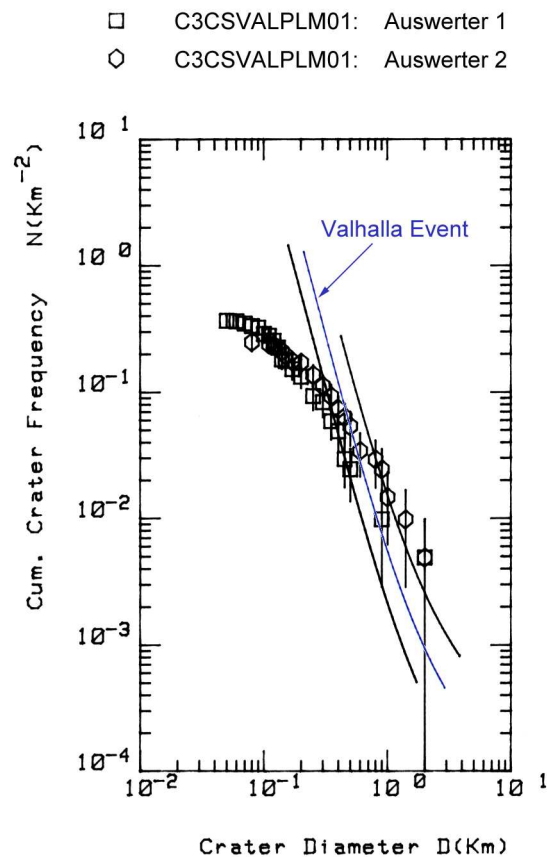


Abbildung 8.23.: Kumulative Kraterhäufigkeit des SSI-Zielgebiets C3CSVALPLM01. Gezeigt sind Vergleichsmessungen zweier unterschiedlicher Auswerter. Die Kraterverteilung, die den im Zielgebiet C9CSVALHAL02 gemessenen und bestimmten Valhalla-Event angibt, wurde mit der Callisto-Produktionsverteilungskurve zu den kleineren Kratern hin extrapoliert und in das Diagramm mit eingezeichnet. Siehe Text für weitere Erläuterungen.

ziemlich flach, etwa mit einer Steigung von -1 . *Chapman et al.* (1997, 1998) sahen darin den Hinweis auf eine verhältnismäßig geringe Zahl kleinerer Projektile. Wie in späteren Abschnitten noch zu sehen sein wird, ist die flache Verteilung aber eher das Ergebnis von Erosionsprozessen. Ein durchaus signifikanter Einfluss auf die Erkennbarkeit der kleineren Krater liegt zudem auch in der hohen ICT-Kompression, da die flache Verteilung etwa genau in dem Durchmesserbereich (in Pixel) auftritt, in dem auch die Artefakte der Kompression liegen.

Problematischer ist die Interpretation, welche der annähernd kreisförmigen hellen Strukturen wirklich abgetragene Kraterränder darstellen, und welche dieser Krater primär oder sekundär sind. Beide Auswerter kamen hier zu unterschiedlichen Ergebnissen, die in einem Fall (Auswerter 1: Autor) zu einem Alter (*Model I*: 3.83 Ga) führten, das unterhalb des Valhalla-Events liegt (blaue Kurve im kumulativen Häufigkeitsdiagramm in 8.23). Auswerter 2 (U. Wolf) bezog hier deutlich mehr Krater in die Messung mit ein, woraus sich ein Alter über dem des Valhalla-Events ableitete (*Model I*: 4.13 Ga). In keinem Fall spiegelt sich in der Verteilung der kleineren Krater

der Valhalla-Event wieder.

8.4.6. Zielgebiet: Valhalla Graben (C3CSVALGRB01)

Etwa bei 4° nördlicher Breite und 32° westlicher Länge wurde der westliche Rand eines der Ringgräben der Valhalla-Impaktstruktur von der SSI-Kamera mit 44 m/pxl abgebildet (vergl. Abb. 8.15, Abschnitt 8.4.1). Das Mosaik des Zielgebietes C3CSVALGRB01 aus drei SSI-Einzelbildern zeigt Bild 8.24 im Kontext der Daten von C9CSVALHAL01. Obwohl der Auflösungsunterschied zu den niedriger aufgelösten C9-Daten (410 m/pxl) hier nur etwa einen Faktor 9 beträgt, kann das höher aufgelöste Mosaik nicht exakt lokalisiert werden. Eine mögliche Ursache ist der unterschiedliche Sonnenstand zwischen den beiden Datensätzen. In den C3-Daten stand die Sonne nur 6° über dem Horizont, in den C9-Daten dagegen 42°.

Die Oberfläche des Zielgebietes C3CSVALGRB01 ähnelt der der zentralen Ebenen. Die linearen, hellen Bergrücken erscheinen hier wegen des niedrigeren Sonnenstandes und des Schattenwurfes scharfkantiger. An einigen Stellen sind ICT-Kompressionsartefakte (**ICT**) auffallend. Die Bergrücken, die hier mehrere Kilometer lang sind, verlaufen entweder konzentrisch zum Grabenrand (**cr**) oder radial zum Beckenzentrum (**rr**). Daneben ist helles Gebiet auch in Gruppen von Hügeln oder Massiven (**m**) konzentriert. Stark abgetragene Krater, von deren Rändern teilweise nur noch einzelne Segmente vorhanden sind (**d**), sind hier ebenso vorhanden wie in den zentralen hellen Ebenen.

Schattenmessungen der Bergrücken ergaben ähnliche Höhen wie in den zentralen Ebenen, d. h. mehrere Zehnermeter bis zu etwa 130 m. Die langen Schatten und die scharfen Kämme rufen den Eindruck nach Westen flach einfallender und nach Osten steil "überhängender" Strukturen hervor. In Wirklichkeit sind die Rücken, wie auch aus anderen, bei höher stehender Sonne aufgenommenen Zielgebieten hervorgeht, eher konisch geformt.

Das dunkle Material erscheint wegen des niedrigen Sonnenstandes weniger glatt als in den zentralen Ebenen. Die Ränder fast völlig überdeckter Krater, ähnlich den vom Erdmond her bekannten (dort von Mare-Laven überdeckten) "Geister-Kratern" (*ghost craters*) sind an einigen Stellen im dunklen Material zu erkennen (**g**).

Schwach erkennbare lineare Strukturen verlaufen etwa ENE-WSW bzw. (weniger ausgeprägt) WNW-ESE und zeichnen ein altes Kluftsystem innerhalb der vom dunklen Material weitgehend verdeckten alten rauheren Oberfläche nach, an dem die Erosion ansetzte (weiße Linien in Bild 8.24).

Die in diesem Zielgebiet gemessene Krater-Häufigkeitsverteilung (Bild 8.25) unterscheidet sich von der in den hellen zentralen Ebenen. Abschnittsweise lässt sich das Produktionsverteilungs-Polynom durch die Messpunkte legen. Es ergeben sich dabei zwei Alter, ein höheres Alter von **3.74±0.08 Ga** (*Model I*) bzw. von **640 Ma** (oberer/unterer Wert: 2.43 Ga, 140 Ma) (*Model IIa*), und ein jüngerer von **3.4 ± 0.12 Ga** bzw. von **199 Ma** (oberer/unterer Wert: 911 Ma, 40 Ma)⁶⁰. Ob es sich um eine echte Überprägung handelt, ist unklar. Die folgende mögliche Erklärung

⁶⁰Die Werte für *Model IIb* betragen 1.56 Ga (3.26 Ga, 590 Ma) bzw. 530 Ma (1.41 Ga, 180 Ma).

CALLISTO: SSI target area C3CSVALGRB01 (44 m/pxl)

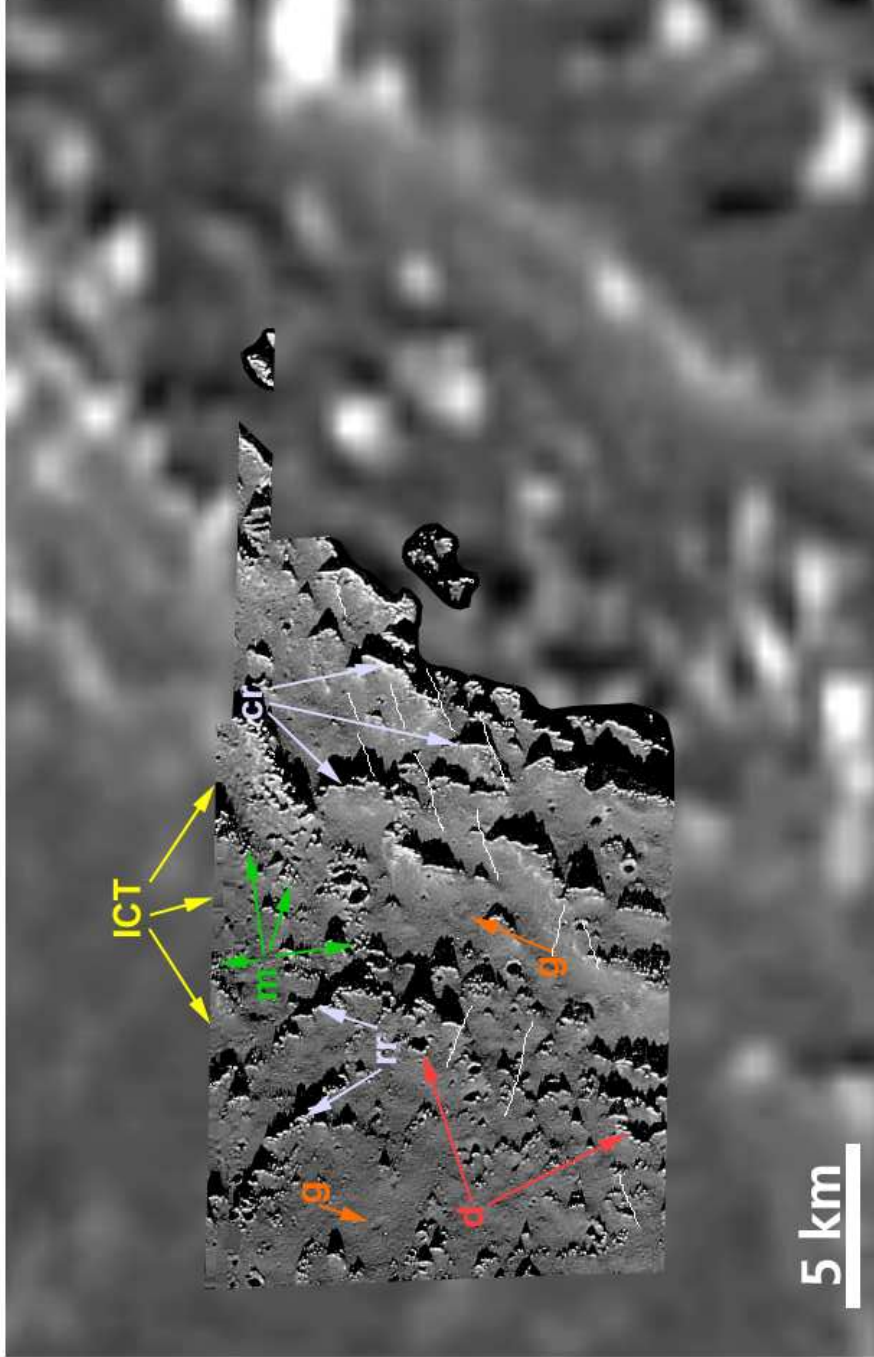


Abbildung 8.24.: Detailaufnahme der südlichen Grabenstrukturen von Valhalla in hoher Auflösung. Mosaik des Zielgebiets C3CSVALGRB01, Bildnummern C3C0090, C3C0091, C3C0092 (44 m/pxl). Mercatorprojektion, kontrast- und kantenverstärkt. Dargestellt im Kontext der SSI-Bilder C9C0023 und C9C0025, Zielgebiet C9CSVALHAL02 (410 m/pxl). Wegen des hohen Auflösungsunterschieds und der unterschiedlichen Beleuchtungsgeometrie ist die Lage des hoch aufgelösten Mosaiks im Kontext nicht genau anzugeben. Nähere Erläuterung der Symbole im Text.

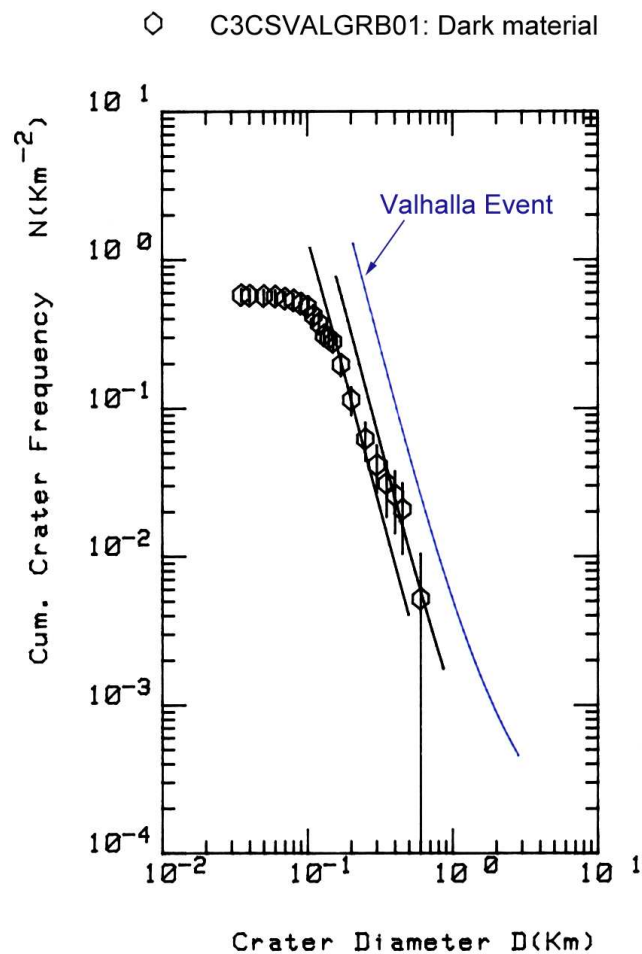


Abbildung 8.25.: Kumulative Kraterhäufigkeit des SSI-Zielgebiets C3CSVALGRB01. Kurve des Valhalla-Events (gemessen in Einheit Vcb , Zielgebiet C9CSVALHAL02) enthalten.

bietet sich an: Es wurden unterschiedlich erosions-resistente Schichten nacheinander abgetragen. Zunächst bildete sich (1) auf härterem, langsamer durch Sublimation verwitterndem Material einige Zeit nach dem Valhalla-Event eine steile Kraterverteilung. (2) Eine weichere Schicht wurde schließlich freigelegt, Einschläge und Sublimationsverwitterung waren im Gleichgewicht, die Verteilung wurde flacher, erfasste aber nicht die älteren größeren Krater. (3) Nach Abtragung der weicheren Schicht wurde wieder eine härtere, darunter liegende Schicht exponiert. Erosion und Abtragung verliefen wieder deutlich langsamer. Eine steilere Kraterverteilung mit einer der Produktionsverteilung vergleichbaren Steigung konnte unterhalb eines Grenzdurchmessers (ca. 300 m) entstehen.

8.4.7. Zielgebiet: Scarp and Smooth Plains (C3CSVALPLN01)

Ein aus fünf Einzelbildern bestehender, von West nach Ost verlaufender Streifen deckt einen Grabensteilrand des Valhalla-Beckens und angrenzende Bereiche etwa bei einer Breite von 37°

N und 33 – 36° W Länge ab. Die genaue Bezeichnung dieses mit 49 m/pxl Auflösung aufgenommenen Zielgebiets C3CSVALPLN01 lautet *scarp and smooth plains*. Abbildung 8.26 zeigt das Mosaik dieses Zielgebiets im Kontext der mit 410 m/pxl niedriger aufgelösten C9-Daten. Anders als in den bereits beschriebenen beiden Zielgebieten ist die Lokalisierung der höher aufgelösten Sequenz hier trotz der Datenlücken zweifelsfrei.

Die geologische Karte dieses Zielgebiets ist in Bild 8.27 dargestellt. Die dunklen, glatten Krater Ebenen (*smooth plains*) und der Grabenboden lassen sich in mehrere Einheiten unterteilen. Aus ihren Kraterhäufigkeitsmessungen ergaben sich mit einer Ausnahme Zuordnungen dieser Einheiten zum Valhallischen System (obere Serie). Auf dem stratigraphischen Diagramm in Bild 8.27 sind sie etwas voneinander versetzt eingezeichnet, entsprechend der Unterschiede ihrer gemessenen Retentionsalter.

Die jüngste Einheit, **Vgf - graben floor material**, bildet den Boden des Grabens östlich des Steilhangs. Der Graben ist hier bis zu 800 m tief. Das dunkle Material auf dem Grabenboden bedeckt eine wellige Oberfläche. An vielen Stellen treten lineare Rücken zutage, die parallel zum Grabenrand verlaufen.

Aus der kumulativen Häufigkeit im dunklen Material des Grabenbodens ergibt sich ein *Model I*-Alter von 3.63 ± 0.04 Ga. Die korrespondierenden Alter von *Model IIa* sind 380 Ma (1.62 Ga, 79 Ma) (bzw. 980 Ma (2.35 Ga, 350 Ma in *Model IIb*). Das Modellalter liegt deutlich unter dem des Valhalla-Beckens. Die Einheit ist nach dieser Datierung in die Obere Valhallische Serie einzuordnen.

Bild 8.29 zeigt die Verteilung der Einheit *Vgf* (Dreieckssymbole) im Vergleich zu zwei anderen Einheiten des Gebiets. Aus ihrem steilen Verlauf bis zum Erreichen der Bildauflösung etwa bei 150 m folgt, dass kein nachfolgender geologischer Prozess mehr auf die Krater eingewirkt hat, zumindest nicht im erfassten Durchmesserbereich. Die Messfläche liegt noch innerhalb des kontinuierlichen Ejektabereichs eines etwa 21 km großen Kraters auf dem Grabenboden (in der rechten unteren Ecke in Bild 8.26) und könnte deshalb auch Ejekta und damit das Alter des eindeutig post-Valhallischen Kraters repräsentieren.

Der Boden des Grabens ist von hellen, linearen Rücken durchzogen, die parallel zum Grabenrand verlaufen. Sie ragen aus dem dunkleren Material heraus, sind teilweise davon auch überdeckt und somit älter als das dunkle Material des Grabenbodens. Im Durchschnitt sind sie 100 bis 150 m hoch. Diese Einheit **Vlr - material of linear ridges** ist der Valhalla-Gruppe zuzurechnen, da sie aufgrund ihres parallelen Verlaufs zum Grabenrand in direktem Zusammenhang mit der Entstehung des Beckens stehen.

Die dunklen Ebenen westlich des Grabenrandes gliedern sich in wenigstens drei unterschiedliche Varianten auf. Die Einheit **Vgs - graben slope material** grenzt westlich unmittelbar an den Grabensteilrand. Die Albedo dieser Einheit ist etwas höher als die der übrigen dunklen Einheiten. Dies suggeriert ein nach Westen abfallendes Gelände und eine Aufwölbung des Grabenrandes zum Grabeninnern. Leider lässt sich dies nicht durch eine Stereo-Anaglyphendarstellung belegen.

Die Grenze der Einheit *Vgs* zur westlich anschließenden Einheit *Asp* hat den Anschein einer sehr schwach ausgeprägten Fließfront. Morphologische Anzeichen kryovulkanischer Aktivität fehlen,

CALLISTO: SSI target area C3CSVALPLN01 (49 m/pxl)

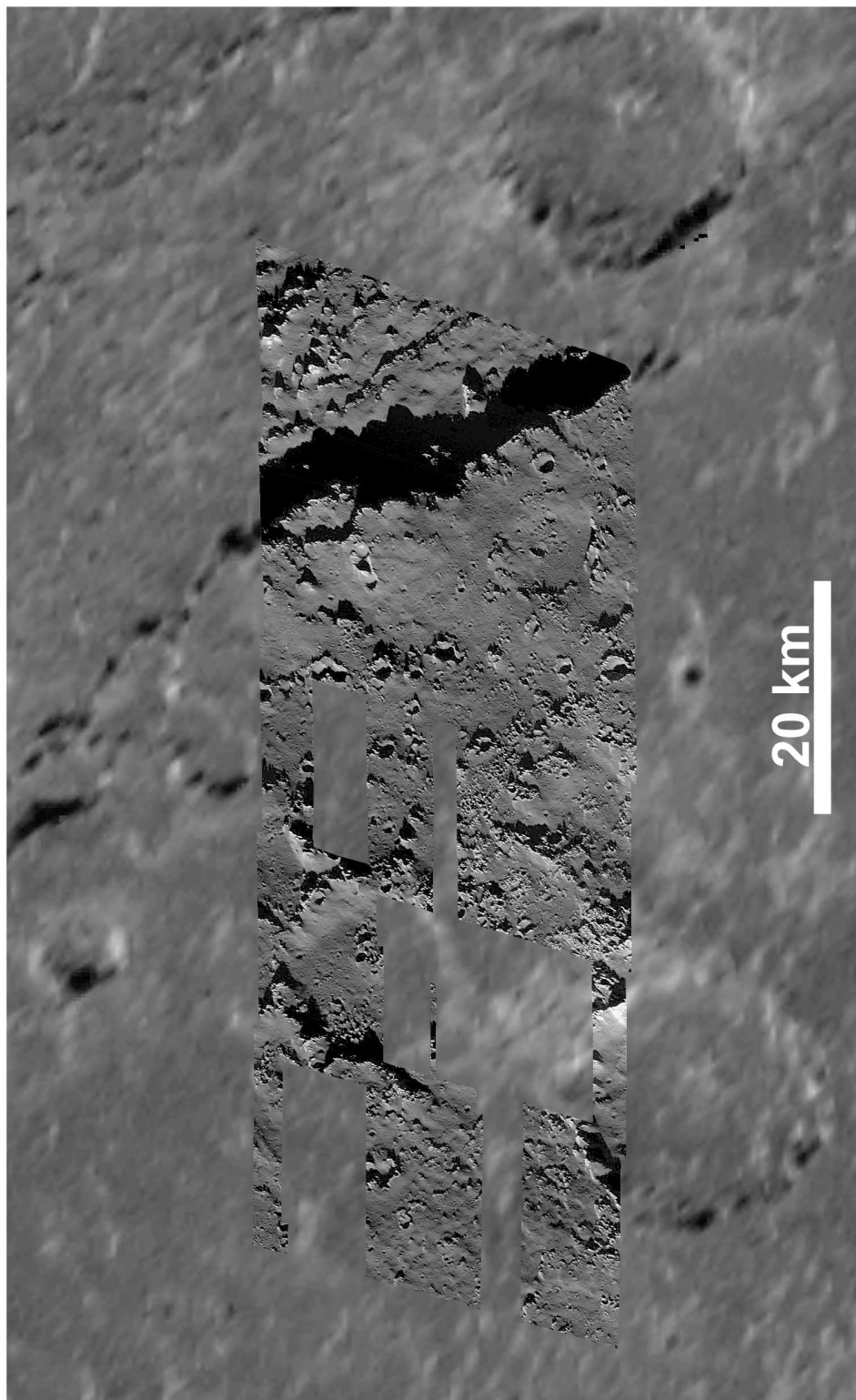


Abbildung 8.26.: SSI-Zielgebiet C3CSVALPLN01: Nordöstlicher Bereich von Valhalla bei 37° N Breite und 33 – 36° W Länge mit Grabensteilrand (*scarp*) und "glatten Ebenen" (*smooth plains*); hoch aufgelöstes Mosaik aus den SSI-Aufnahmen C3C0065 - C30069 (49 m/pxl) im Kontext des C9-Bildes C9C0016 (550 m/pxl), in winkeltreuer Lambert'scher Projektion.

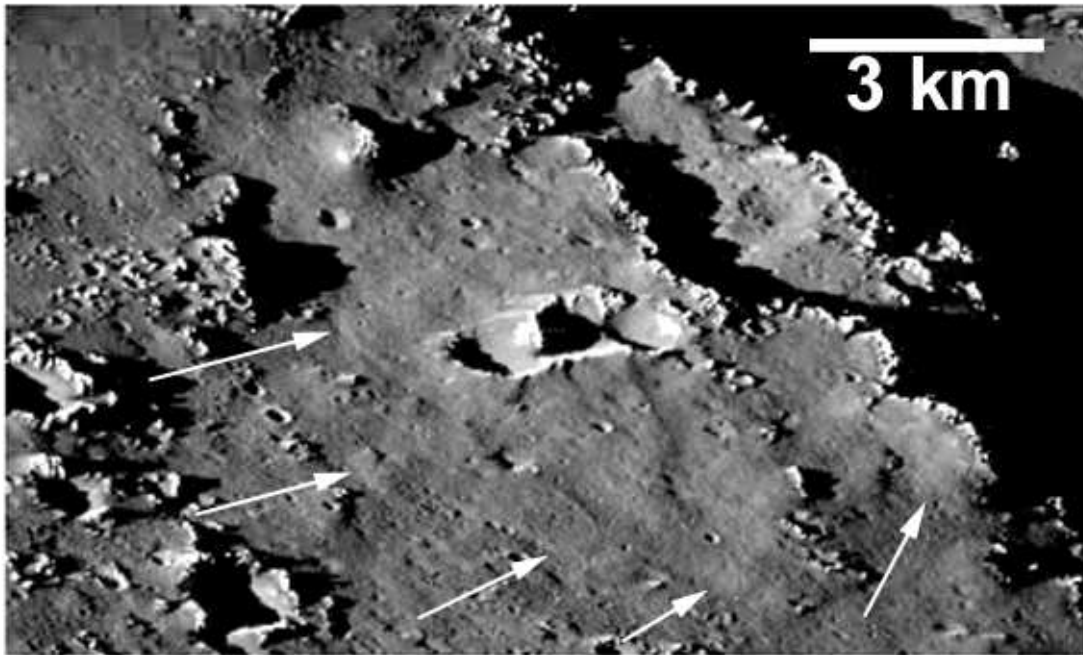


Abbildung 8.28.: Mögliche Fließfronten an der äußeren Grenze der Einheit *Vgs* zur Einheit *Asp*. Die Fließfronten sind durch Pfeile markiert. Ausschnitt des SSI-Bildes C3C0066, nicht kartenprojizierte Originalaufnahme.

somit kommen nur Massenbewegung an Hängen in Frage. Da hier kaum eine nennenswerte Oberflächenneigung vorherrscht, könnte dies bedeuten, dass sich das vermutlich sehr feinkörnige Material bereits bei geringen Neigungswinkeln in Bewegung setzte und über längere Strecken (mehrere Kilometer) transportiert wurde. Bild 8.28 zeigt die Einheit *Vgs*, hier in einem Ausschnitt der nicht kartenprojizierten schrägen Originalaufnahme. Die mutmaßlichen Fließfronten sind durch Pfeile markiert.

Die am westlichsten Rand des Zielgebietes gelegene *Plains*-Einheit, **Vsp - dark, smooth plains material** weist nur wenige Krater im Kilometerbereich auf. Kleinere, helle Massive ordnen sich an einigen Stellen ringförmig an und sind als fast völlig zerstörte Krater zu erkennen. Andere helle Massive verlaufen annähernd linear. Aus der gemessenen kumulativen Häufigkeit dieser Einheit ergab sich ein Alter von $3.9 \pm 0.03 \text{ Ga}$ (*Model I*) bzw. von 1.4 Ga (*Model IIa* (oberer/unterer Wert: 3.84 Ga, 320 Ma), also eindeutig post-Valhallisch. Bild 8.29 stellt die kumulative Verteilung der Einheit *Vsp* dar. Die Verteilung verläuft bei den größeren Kratern zunächst steil und wird unterhalb eines Durchmessers von etwa 500 m flacher.

Eine weitere Einheit der *dark, smooth plains* schließt sich an die Einheit *Vsp* bis nach Osten zum Grabenrad an bzw. grenzt an die Einheit *Vgs*. Diese Einheit ist geprägt durch deutlich mehr Krater im Kilometerbereich in unterschiedlichen Erhaltungszuständen, verglichen mit den übrigen Einheiten. Stark abgetragene oder fast völlig überdeckte Krater und Kraterruinen mit

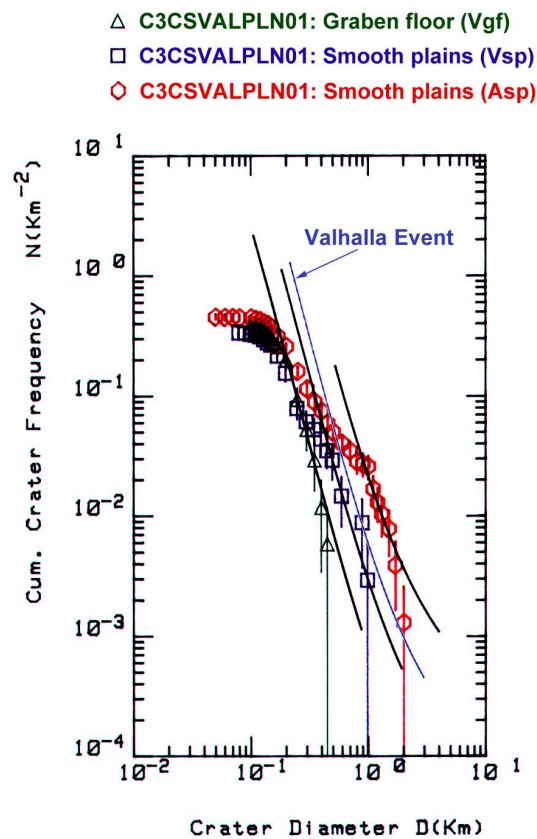


Abbildung 8.29.: Kumulative Kraterhäufigkeit des SSI-Zielgebiets C3CSVALPLN01; Einheiten *Vgf*, *Vsp* und *Asp*; siehe Text für Erläuterungen.

Durchmessern von mehr als 10 km sind ebenfalls für diese Einheit charakteristisch.

Die Form ihrer Kraterverteilung unterscheidet sich von der der übrigen Einheiten dieses Zielgebiets, wie Bild 8.29 verdeutlicht. Im Durchmesserbereich zwischen 1 und 2 km folgt die Verteilung ziemlich genau der Produktionsverteilung, wird aber bei Durchmessern unter 1 km deutlich flacher und nähert sich in der Steigung der Verteilung der beiden anderen im Diagramm enthaltenen Einheiten an. Für den Abschnitt der Krater über 1 km Durchmesser liegen die Modellalter bei 4.2 ± 0.04 Ga (*Model I*) bzw. bei 4.27 Ga (*Model IIa*, oberer/unterer Wert: 4.56 Ga und 1.93 Ga). Die größeren Krater, die teilweise auf dem dunklen Material sitzen oder (zum Großteil) darunter liegen, existierten bereits vor der Entstehung des Valhalla-Beckens, wurden beim Einschlag nicht völlig zerstört und/oder von den Auswurfsmassen überdeckt. Diese Einheit der *dark, smooth plains*, dem diese Krater aufsitzen und deren Substrat nicht mehr überall aufgeschlossen ist, wurde daher ins nächst-ältere stratigraphische System (Asgardian) gestellt und erhielt die Einheitenbezeichnung **Asp**.

Die übrigen Einheiten lassen sich mit Einschlagskraterhäufigkeiten nicht datieren. Hauptkennzeichen der topographisch höher gelegenen hellen Einheit **Akr - material of knobs and ridges** ist die so genannte *Honigwabentextur* (*honeycomb texture*) (Moore et al., 1999). Sie kommt durch

Gruppen eng benachbarter Hügel (*knobs*), Grate oder linearer Rücken zustande, die aus dem dunklen Material herausragen. Die Einheit ist auch noch in den niedriger aufgelösten C9-Daten zu identifizieren, die zur Auffüllung der C3-Datenlücken benutzt wurden.

Einschlagskrater unterschiedlichen Erhaltungszustandes von wenigstens 2 km Durchmesser und mehr bilden die restlichen Einheiten. Zwei Krater innerhalb des Gebiets sind so groß, dass sie in mehr als eine Einheit untergliedert werden konnten. Die am besten erhaltenen Krater, deren Ränder nicht mehr sehr scharf sind und somit bereits Spuren von Abtragung aufweisen, gehören der Einheit **c₂** bzw. **VAc - material of partly degraded craters** an. Ein gerade noch mit seinem nördlichsten Rand im Zielgebiet noch erfasster, ca. 20 km großer Krater dieses Types konnte in Kraterrand und Boden (**VAr - material of partly degraded crater rim** und **Vaf - material of crater floor**) unterteilt werden. Der Krater könnte älter als Valhalla, aber auch nach Valhalla entstanden sein, da sein Erosionszustand in den C9-Daten dem des etwa gleich großen Kraters auf dem Grabenboden entspricht (vergl. Bild 8.26).

Sehr stark abgetragene Krater im Kilometerbereich wurden in die Einheit **c₁** bzw. **ApAc - material of heavily degraded crater** eingegliedert bzw. konnten im Fall eines etwa 19 km großen Kraters in Rand und Boden unterteilt werden (**ApAr** bzw. **ApAf**). Diese stark abgetragenen Krater der lithostratigraphischen Gruppe **c₁** dürften alle bereits vor dem Valhalla- oder Asgard-Becken existiert haben.

An einigen Stellen der dunklen Einheiten lässt sich helles Material durch annähernd kreisförmige Anordnung unschwer als Kraterruinen identifizieren. Die Durchmesser dieser Ruinen liegen in diesem Gebiet in der Regel über 5 km. Die Krater existierten mit Sicherheit bereits vor dem Valhalla-Becken, sie wurden als eigene Einheit **ApAu - material of crater ruins** auskartiert.

Unregelmäßig geformte, häufig in Gruppen angeordnete Krater im Kilometerbereich wurden als Einheit **VpVcs - material of secondary craters, undivided** kartiert. Die Alterszuordnung aufgrund des Abtragungszustandes ist nicht eindeutig. Eine Gruppe stark abgetragener Sekundärkrater befindet sich beispielsweise auf dem Grabenboden und ist damit eindeutig post-Valhallisch, könnte aufgrund des Erhaltungszustandes aber eher als prä-Valhallisch angesprochen werden. Der Ursprungskrater ist nicht bekannt. Mögliche Kandidaten für Ursprungskrater sind z. B. der auf dem Grabenboden gelegene 21 km große Krater oder der der Erosionsklasse **c₃** (**BVc**) zuzuordnende Krater *Sigyn* (50 km Durchmesser, 36° Nord, 29° West), der etwa 250 km vom Zielgebiet C3CSVALPLN01 entfernt liegt und von einem weitreichenden hellen Ejektafeld umgeben ist (**S** in Bild 8.17 (unten)).

8.4.8. Zielgebiet: Gomul Catena (C3CSCATENA01)

Gomul Catena, eine 343 km lange Kraterkette aus mindestens 26 Einzelkratern liegt im nordöstlichen Sektor des Valhalla-Beckens etwa bei 36° N und 48° W (**GC** in Bild 8.15). Die Kette ist nicht radial auf das Valhalla-Zentrum ausgerichtet, entstand somit nicht durch Ejekta während des Valhalla-Events. Sie überdeckt Grabenstrukturen des Beckens und ist damit post-Valhallisch.

Die Daten des Zielgebiets C3CSCATENA01 weisen eine maximale Auflösung von 40 m/pxl

auf. Ein Mosaik in winkeltreuer Lambert'scher (Kegel-)Projektion dieses Zielgebiets C3CSCATENA01 im Kontext der C9-Daten (hier ≈ 410 m/pxl) ist in Bild 8.30 dargestellt.

Die drei geologischen Haupteinheiten, auf denen Kraterhäufigkeitsmessungen durchgeführt wurden, sind in Bild 8.31 (1 - 3) dargestellt. Außerhalb der Kraterkette sind in der durch SSI abgedeckten Region keine Anzeichen heller Ejekta festzustellen. In den südlich der Kette gelegenen Kraterebenen (Bild 8.31, 3) überwiegt dunkles, hier leicht welliges Material. Helles, topographisch höher gelegenes Material bildet die Ränder stark abgetragener Krater und lineare Bergrücken, die der Valhalla-Struktur angehören. Die Durchmesser der in der hellen Einheit zu erkennenden Kraterstätten liegen im Bereich von 1 km und höher, die der Krater im dunklen Material deutlich unter 1 km.

Auf den ersten Blick fällt die relativ geringe Zahl kleinerer Krater auf, die im Gegensatz steht zu der ansonsten auf Callisto überall zu beobachtenden Häufigkeit größerer Krater. Wie in den vorangegangenen Abschnitten 8.4.5 bis 8.4.7 bereits erwähnt, wurde dies mit einer geringeren Zahl kleinerer Projektile und mit einer vom inneren Sonnensystem abweichenden Projektilpopulation erklärt (vergl. *Chapman et al.*, 1997, 1998). Es sind jedoch folgende Faktoren zu berücksichtigen, die die Interpretation der Kratermessung beeinträchtigen: (1) die Messung hier in einer bereits durch den Valhalla-Einschlag sowie durch den nachfolgenden Einschlag der Kraterkette "verjüngten" Oberfläche, (2) der Einfluss der ICT-Datenkompression, der sich auf Krater von wenigen 100 m auswirkt, und (3) das (fehlerhafte) Nicht-Mitmessen der Kraterstätten. Berücksichtigt man diese Faktoren bei der Interpretation, so ergibt sich ein etwas anderes Bild.

Bild 8.32 stellt die in den Einheiten des Zielgebiets C3CSCATENA01 gemessenen Kraterverteilungen dar. In 8.32 (a) ist die Messung nur im dunklen Material der Kraterebenen südlich der Kraterkette, der Einheit **Vcp - cratered plains**, der Messung nur der Kraterstätten im gleichen Gebiet gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die Messung der Kraterstätten praktisch die erhaltene gebliebene steile Produktionsverteilung einer alten Kraterverteilung (genauer: Asgardisch bis prä-Asgardisch) bis herab zu Kratern von wenigstens etwa 800 m Durchmesser darstellt. Folgende Modellalter wurden dabei abgeleitet: *Model I*: 4.23 Ga (Fehler ± 0.03 Ga); *Model IIa*: 4.42 Ga (4.56/1.7 Ga) (für *Model IIb* resultiert ein sicher falsches Modellalter von 4.56 Ga).

Nördlich der Kette (Bild 8.31, 1) erscheint das Gelände rauher und durchzogen von einer größeren Zahl abgetragener, heller Kraterstätten. Das dunklere Material ist hier weniger mächtig, so dass die tiefer liegenden älteren, helleren Schichten aufgeschlossen sind. Hier ist auch die Häufigkeit von Kratern zwischen etwa 500 m und 1 km höher als in den Kraterebenen südlich der Kraterkette, was auch durch die Messung bestätigt wird. Die Messungen in dieser Einheit **cratered plains - ApAcp** nördlich der Kraterkette (Bild 8.32 (b)) bestätigen wie für die Kraterstätten ebenfalls ein Asgardisch/prä-Asgardisches Modellalter.

Das kumulative Häufigkeitsdiagramm in Bild 8.32 (b) zeigt zusätzlich die auf dem Boden der Kraterkette (Einheit: **catena floor material - Vcaf**) gemessene Verteilung. Ferner zeigt das Diagramm zum Vergleich die Kurve des Valhalla-Events. Klar ersichtlich ist die bereits vor Valhalla und Gomul Catena existierende Population von Kratern zwischen Durchmessern von etwa 500 und 900 m (rote Datenpunkte oberhalb der Valhalla-Kurve).

Durch die Verteilung auf dem Boden von Gomul Catena lassen sich zwei (post-Valhallische)

CALLISTO: Gomul Catena (Target area C3CSCATENA01, 40 m/pxl)

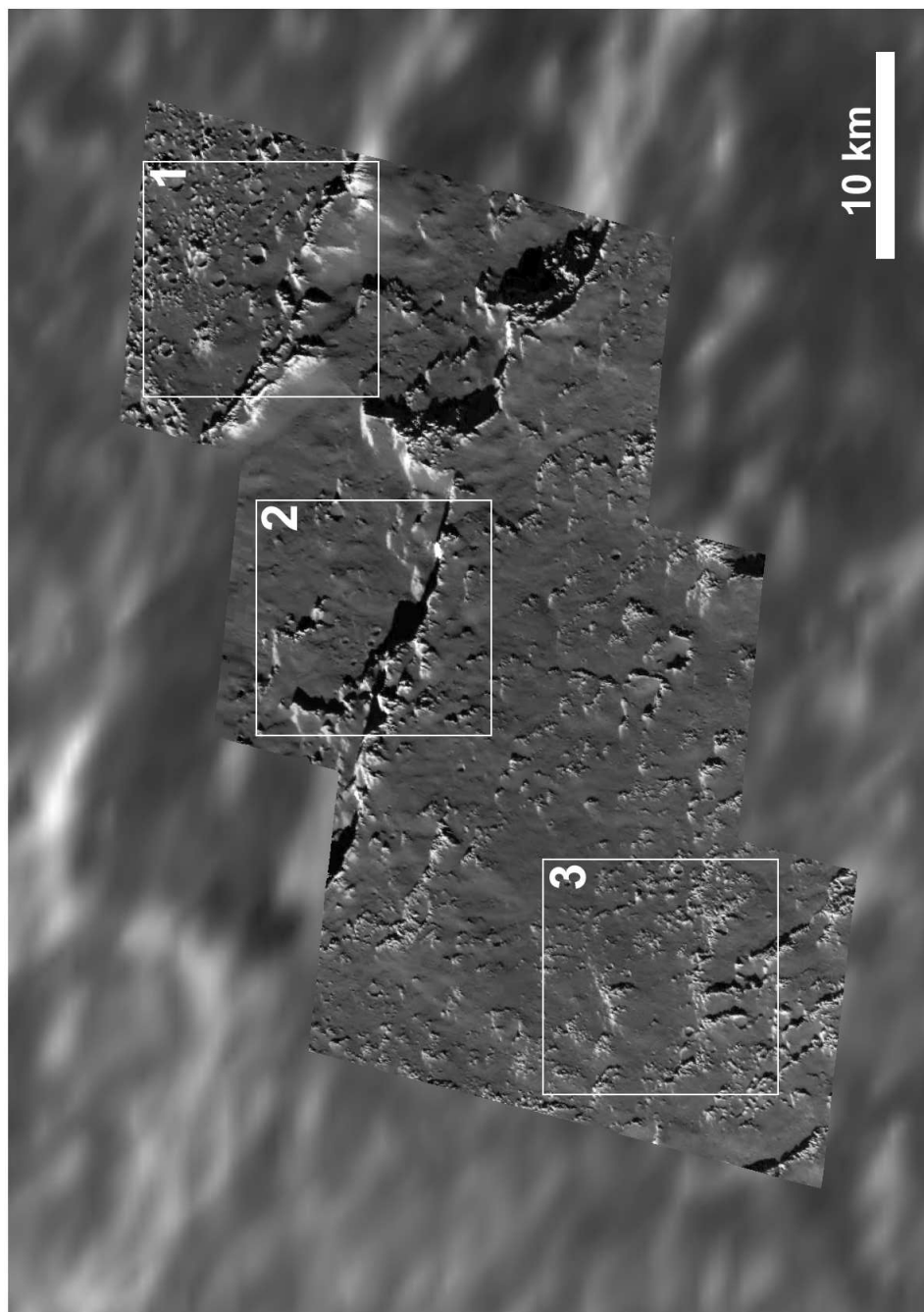


Abbildung 8.30.: SSI-Zielgebiet C3CSCATENA01: Kraterkette Gomul Catena; Mosaik (40 m/pxl) aus den SSI-Bildern C3C0044, C3C0045, und C3C0046 in C9-Kontext (Bildnummer C9C0015, 550 m/pxl); winkeltreue Lambert'sche Projektion; Die eingezeichneten Rechtecke 1 - 3 entsprechen den in Bild 8.31 gezeigten Detailansichten.

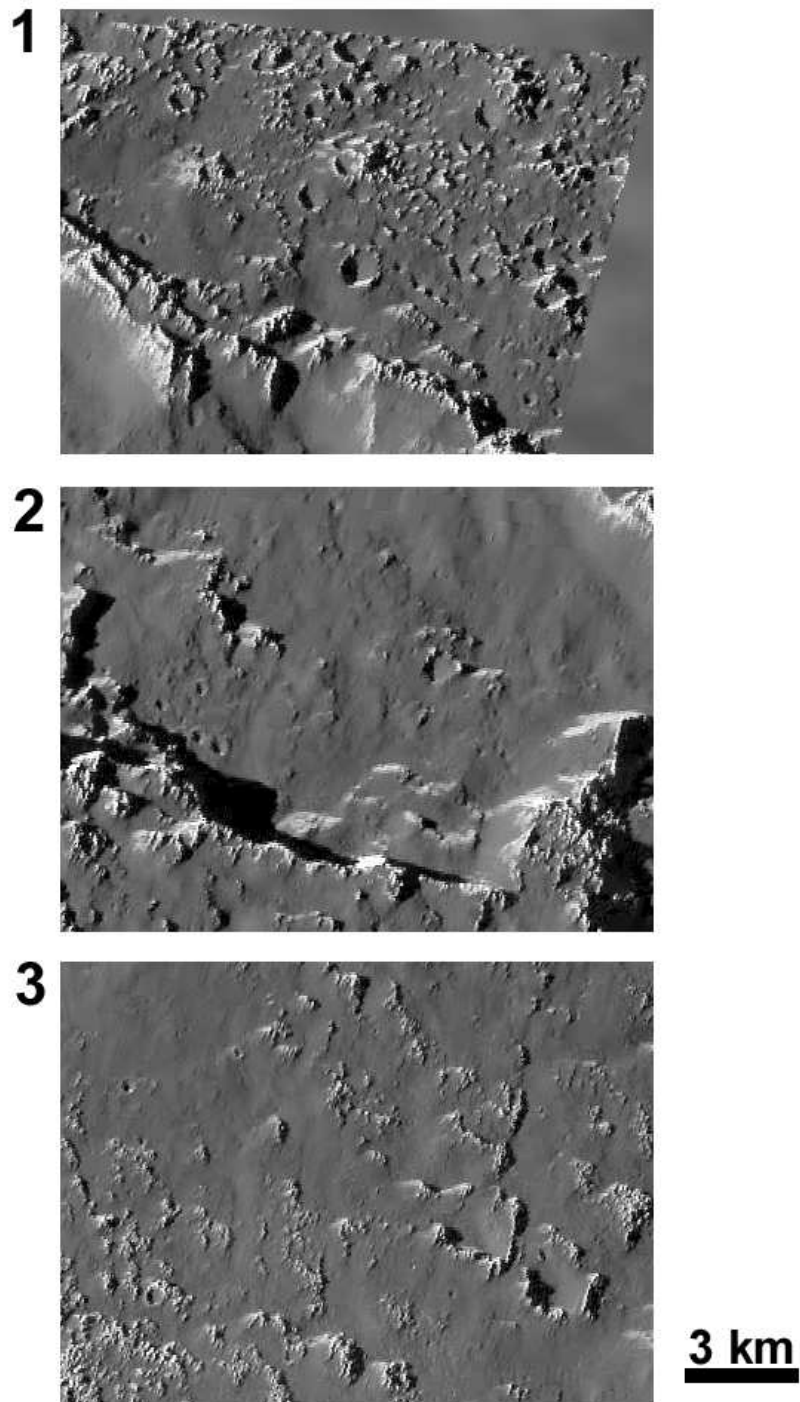


Abbildung 8.31.: Detailansichten geologischer Einheiten des SSI-Zielgebiets C3CSCATENA01, Gomul Catena. Lage der Detailansichten 1 - 3 siehe Abb. 8.30.

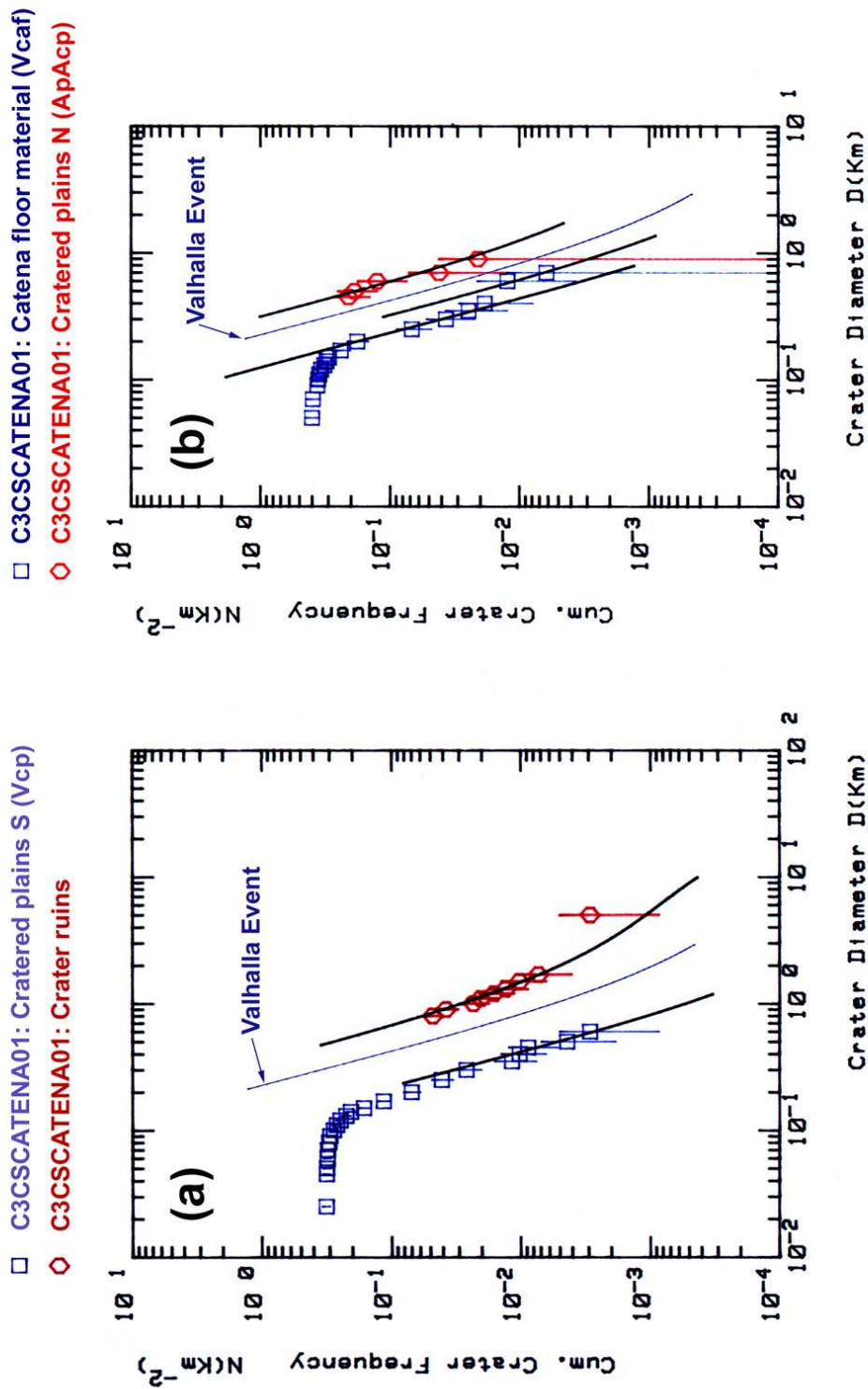


Abbildung 8.32.: Beispiele kumulativer Kraterverteilungen im Zielgebiet C3CSCATENA01; (a) Gebiet südlich der Catena mit Kraterresten (rot) und dunklem Material der Kraterbecken (*cratered plains S*, die dem Valhallischen System zuzuordnen sind (Vcp); (b) Messungen auf dem Catena-Boden (Vcaf) und in den Kraterbecken nördlich der Catena (ApAcp), die Asgardisch/prä-Asgardischen Alters sind. Siehe Text für Erläuterungen.

Alter fitten. Ein höheres Alter ist nur durch zwei Datenpunkte belegt. Die hieraus resultierenden Modellalter sind: *Model I*: 3.84 ± 0.05 Ga; *Model Iia*: 1.09 Ga (3.39 Ga, 242 Ma); *Model Iib*: 2.41 Ga (4.08 Ga, 1.01 Ga). Die Verteilung der kleineren Krater (< 600 m) wird zunächst flacher, verläuft aber zwischen 400 m und 150 m (Auflösungsgrenze) wieder entsprechend einer steilen Produktionsverteilung. Hieraus resultieren folgende Modellalter: *Model I*: 3.59 ± 0.05 Ga; *Model Iia*: 334 Ma (1.44 Ga, 69 Ma); *Model Iib*: 862 Ma (2.13 Ga, 308 Ma).

Vergleichbare Modellalter erhält man aus der Messung nur des dunklen Materials in den Kraterbenen südlich der Kraterkette (Bild 8.32 (a)). Lediglich bei den größeren Kratern ist der Fit wegen des steileren Verlaufs der Verteilung einigermaßen verlässlich. Folgende Modellalter wurden hier ermittelt: *Model I*: 3.51 ± 0.05 Ga; *Model Iia*: 258 Ma (1.15 Ga, 53 Ma); *Model Iib*: 677 Ma (1.74 Ga, 238 Ma).

Ob das auf dem Boden der Catena bestimmte höhere der beiden Alter den Impact-Event datiert, durch den Gomul Catena entstand, ist fraglich. Es könnte (neben dem noch älteren Valhalla-Event) eine obere Grenze darstellen. Dies gilt auch für die möglicherweise noch in den Ejekta liegenden, aber mit 3.51 Ga etwas jüngeren Ebenen südlich der Kraterkette. Dieses Alter entspricht dem maximalen Modellalter von Einheiten des Burrianischen Systems bzw. Periode. In regionaler Auflösung ist es daher vertretbar, Gomul Catena als Vertreter einer Einheit *BVca* zu betrachten, wie in Abschnitt 8.2.4, Abb. 8.5) geschehen.

Wie in späteren Abschnitten näher ausgeführt wird, treten ähnliche Alter - 3.6 - 3.4 Ga in *Model I* - im dunklen Material, gemessen bei Bildauflösungen unter 100 m/pxl, an mehreren Stellen auf Callisto auf. Daraus ist zu schließen, dass hier nicht Alter einer bestimmten geologischen Einheit (wie der Kraterkette Gomul Catena) bestimmt wurden, sondern dass sich aus der Kratermessung lediglich das durchschnittliche Alter des dunklen Verwitterungsrückstandes ableiten lässt.

8.4.9. Geologische Prozesse in der Valhallischen Periode

Valhalla entstand (a) durch den Einschlag eines Asteroiden von etwa 60 - 70 km Durchmesser oder (b) durch den Einschlag eines großen Kometen oder Kuipergürtelobjekts in der Größenordnung von ≈ 100 km, (*Zahnle et al.*, 2003). Mit dem Valhalla-Einschlag begann eine Periode, die geprägt ist (1) von Impakten, in der sich die stratigraphisch jüngsten auf Callisto vorhandenen großen Becken bildeten, (2) von tektonischen Deformationen, die aber an die Entstehung von Valhalla gekoppelt waren, (3) und von Erosion und Abtragung, wodurch sich ein dunkler, überall auf der Callisto-Oberfläche vorhandener Schutt bildete. In der Sichtweise von *Model I* überdeckt die Valhallische Periode einen Zeitraum von ≈ 500 Ma (4 Ga bis wenigstens 3.5 Ga), also einen etwa vergleichbaren Zeitraum wie die lunare Imbrische Periode. Im Rahmen dieses Modells kann die Valhallische Periode in eine ältere und eine jüngere, durch den Lofn-Impakt definierte Epoche unterteilt werden. In der Sichtweise von *Model Iia/Iib* begann die Valhallische Periode vor 2 bzw. mehr als 3.5 Ga und dauerte mindestens 1 Ga. Lofn stellt hier auch nicht den *marker horizon* dar, sondern ist Teil eines mehr oder weniger konstanten Impaktorflusses (vergl. Abschnitt 8.2.8).

Multiringbecken auf Callisto und auf Ganymed - auf letzterem nur durch konzentrische Furchen-

systeme ohne erkennbare Einschlagszentren nachweisbar (vergl. *Passey und Shoemaker, 1982*) - unterscheiden sich von den Becken auf den terrestrischen Planeten insbesondere durch die große Anzahl von Ringen. Im Wesentlichen haben sich vier Theorien herauskristallisiert, die das Entstehen von Ringbecken sowohl auf terrestrischen Körpern wie auf Eissatelliten erklären könnten. Alle gehen von einer Schichtung der Kruste in rheologisch unterschiedliche Bereiche oder Zonen bis in mehrere Zehnerkilometer Tiefe aus. Zusätzlich zu den rheologischen Eigenschaften geht die Mächtigkeit dieser Zonen signifikant in die Entstehung von Ringen ein.

1. Im *Tsunami-Modell* verursacht ein großer Impakt wellenartige Bewegungen in der zähen oder "fluidisierten" (*fluidized*) Kruste⁶¹. Nach dem Impakt frieren die Wellen praktisch ein, ein charakteristisches Ringmuster entsteht. Dieses Modell wurde als Erklärung für das lunare Orientale-Becken eingeführt (*Van Dorn, 1968*) und nach den Voyager-Vorbeifügen an den Jupitermonden auch auf die Ringbecken der Galileischen Eissatelliten als mögliche Entstehungsursache übertragen (*Smith et al., 1979a*).
2. Ebenfalls auf Untersuchungen lunarer Becken geht das *Megaterrassen-Modell* zurück (*Hartmann und Wood, 1971; Head, 1977*). Es deutet die Ringe als Kollapsstrukturen mit nach innen gerichteten Steilhängen, ähnlich Terrassen am inneren Rand eines Kraters. Dieses Modell ist auf die Ringbecken der Galileischen Satelliten nicht anwendbar, da es die Furchen und Gräben nicht erklärt.
3. Das *Nested Crater Model* geht von Schichten unterschiedlicher Festigkeit in der Kruste aus. Die Ringe entsprechen den Kraterrändern, die sich jeweils an einer derartigen Grenzfläche durch isostatische Bewegungen bilden (*Wilhelms et al., 1977*). Dieses Modell erscheint plausibel für silikatische Oberflächen, ist aber ebenfalls nicht auf Eisoberflächen anwendbar (*Klemaszewski und Greeley, 2000*).
4. Die Strukturen der Ringbecken auf Ganymed und Callisto sind am ehesten durch das *Ringtektonik-Modell* von *McKinnon und Melosh (1980)* erklärbar. Ein großes Projektil durchschlägt eine relativ dünne eishaltige Lithosphäre und dringt bis in eine plastische Asthenosphäre vor, die sich wie eine Flüssigkeit verhält. Das Material der Asthenosphäre fließt viskos unter dem Einfluss der Gravitation nach innen. Dieses Fließen übt eine Scherspannung auf die Basis der Lithosphäre aus, wodurch wiederum eine radial ausgerichtete Zugspannung entsteht.

Überhaupt keine Ringe entstehen in einer extrem dicken Lithosphäre. d. h. bei einem Vielfachen des Kraterdurchmessers (bzw. genauer: der *transient cavity*; Definition siehe Abschnitt 7.4.4.2) (*McKinnon und Melosh, 1980*). Ist die Lithosphäre wesentlich geringer mächtig als die Tiefe des entstandenen Kraters, entsteht eine große Zahl von Ringen. Bei einer extrem dünnen Lithosphäre dagegen bildet sich nur noch ein System konzentrischer und radialer Brüche durch Relaxation der Asthenosphäre nach dem Einschlag. *McKinnon und Melosh (1980)* fanden, dass Anzahl und Abstände der Ringe von der Mächtigkeit der Lithosphäre abhängen. Relativ dicke Lithosphären in der Größenordnung von etwa

⁶¹Fluidisiert ist hier so zu verstehen, dass sich das Material unmittelbar nach dem Einschlag wie eine Flüssigkeit verhält, weniger dass es zu teilweiser oder vollständiger Aufschmelzung kommt.

der Tiefe des entstandenen Kraters, beispielsweise beim Erdmond, bilden nur eine relativ geringe Zahl von Ringen.

Aus Breite und Abstand der Grabenstrukturen voneinander lässt sich annähernd die Mächtigkeit der Lithosphäre abschätzen. Unter der Annahme, die beiden gegenüberliegenden Grabenwände entsprechen Abschiebungen, die mit einem Winkel von 60° einfallen, entspricht die Breite eines Grabens etwa der Tiefe der Lithosphäre (*McKinnon und Melosh*, 1980). Für Valhalla bedeutet dies eine durchschnittliche Mächtigkeit der Lithosphäre von 15 bis 20 km. Je nachdem, ob der Abschiebungswinkel steiler oder flacher verläuft, wäre die Mächtigkeit entsprechend größer oder geringer (ebd.). *Fink und Fletcher* (1981) fanden für die Furchen in Ganymed's dunklem Gebiet Galileo Regio, dass die Abstände der Furchen etwa das 3.4- bis 4-fache der Lithosphärenmächtigkeit betragen. Übertragen auf einen durchschnittlichen Abstand der Valhalla-Gräben von etwa 70 km ergibt dies eine Größenordnung vergleichbar den von *McKinnon und Melosh* (1980) angegebenen Mächtigkeiten.

Die Herkunft der zu den Grabenrändern parallelen Strukturen auf dem Grabenboden und außerhalb der Ränder ist nicht genau bekannt. *Homan et al.* (1998) nahmen an, es handle sich um Zonen, an denen sich Deformationen nach dem Einschlag entlang prä-existierender Schwächezonen fortsetzen. Zumindest die parallelen Strukturen im Inneren der Gräben könnten durch einen Mechanismus entstanden sein, den *Fink und Fletcher* (1981) für die Bildung von Furchen und Rillen im dunklen bzw. hellen Gebiet auf Ganymed modellierten: Eine Dehnung der Kruste mit einer spröden oder plastischen oberen Schicht und einer darunter liegenden duktilen oder fluiden Schicht bildet an der Grenze zwischen den beiden Schichten wellenförmige Erhebungen und Senken oder "Einschnürungen" (englisch: *necks*). Nach diesem so genannten *necking model* entstehen zwei Wellenlängen an Deformationen: weitere Grabenstrukturen an der dünnsten Stelle zwischen spröder und duktiler Schicht (d.h. an der "Einschnürung"), und kürzere, engständige Gräben und Rücken parallel dazu in der oberflächennäheren spröden Schicht (*Fink und Fletcher*, 1981; *Collins et al.*, 1998b; *Pappalardo et al.*, 1998). Die Anwendbarkeit dieses Modells konnte mithilfe von Höhen- und Neigungsmessungen in SSI-Stereobilddaten von Ganymed *grooved terrain* (Gebiet von Uruk Sulcus) nachgewiesen werden (*Collins et al.*, 1998b; *Giese et al.*, 1998; *Pappalardo et al.*, 1998).

Ob das *necking model* auf die Ringgräben von Valhalla und ihre dazu parallelen Strukturen angewendet werden kann, bleibt vorerst unsicher. Dafür gibt es eine Reihe von Gründen: (1) Es sind keine ausreichenden Bilddaten vorhanden, um digitale Geländemodelle herzustellen und um genaue Höhen- und Neigungsmessungen durchzuführen. (2) Es sind keine eindeutigen Rücken- und Gräben wie im *grooved terrain* nachzuweisen. Ursache hierfür ist vermutlich (neben dem bereits erwähnten Fehlen von Stereobilddaten), dass die noch erkennbaren linearen Rücken bereits stark abgetragen sind. Dies gilt besonders für die außerhalb der Ringgräben gelegenen Rücken. (3) *Collins et al.* (1998b) leiteten eine Strain-Rate von 10^{-14} s^{-1} und eine durchschnittliche Entstehungsdauer des *grooved terrain* im SSI-Zielgebiet von Uruk Sulcus von 10^6 Jahren ab. Die Strain-Raten bei der Entstehung eines Beckens sind aber sehr viel höher. Denkbar ist, dass die parallelen Strukturen erst nach dem Aufreißen der Ringgräben entstanden, als weiterhin Material zur Einschlagsstelle zurück strömte.

Melosh (1982) sieht die Ursache der an einigen Stellen nachweisbaren radialen Strukturen in

einem ringförmig angelegten einengenden Stress (*compressive "hoop" stress*), der durch die Bewegung des Materials in der Asthenosphäre zum Einschlagszentrum entsteht. Die in den SSI-Daten erkennbaren radialen Strukturen durchschneiden die Gräben nicht, sind somit zumindest nicht jünger. Die radialen Strukturen treten nicht überall auf, sondern bevorzugt im südöstlichen Sektor des Beckens. Dieser Eindruck könnte allerdings auch fälschlicherweise entstehen, da die gesamte Westhälfte des Beckens mit Voyager-Daten in einer Auflösung von nur 2 - 2.5 km/pxl abgedeckt ist. Die Abstände der Gräben und ihre Breiten nehmen nach Nordosten zu. Inhomogenitäten in der Kruste sind hierfür die wahrscheinlichste Ursache (*Schenk und McKinnon, 1987*).

Bei großen Einschlägen laufen seismische Wellen durch den ganzen Planeten oder Satelliten. In Fällen hoher Energieumsetzung, also z. B. bei Becken mit mindestens 1000 Kilometer⁶² oder mehr hat dies Deformationen in der dem Becken antipodalen Oberflächenregion zur Folge. Ein derartiges als *weird terrain* bezeichnetes Gebiet wurde beim Caloris-Becken auf Merkur festgestellt (vergl. *Neukum et al., 2001b*, und Zitate darin). Während des letzten Callisto-Vorbeiflugs der Galileo-Sonde wurde die zu Valhalla antipodale Region von der SSI-Kamera aufgenommen (Zielgebiet 30CSANTIVL01, Auflösung 340 m/pxl). Es zeigen sich keine durch seismische Wellen erzeugten Oberflächendeformationen. Dies wird als zusätzlicher Hinweis auf die Existenz eines flüssigen Wassermantels in Callisto gesehen, in dem die seismische Energie derart aufgezehrt wurde, dass sie nicht zur Deformation im Valhalla gegenüberliegenden Gebiet ausreichte (*Watts et al., 1989; Moore et al., 2004*).

Valhalla und das jüngere Lofn-Becken zeigen, wie sich die Callisto-Kruste in der Zeit zwischen den beiden Einschlägen entwickelt hat. Allerdings hängt eine genaue Aussage davon ab, welches Impakt-Chronologiemodell zugrunde gelegt wird. Zum Zeitpunkt, als der Valhalla-Impaktor auf die Oberfläche auftraf, befand sich die Grenze zwischen der spröden Lithosphäre und der zäheren Asthenosphäre etwa 15 bis 20 km (maximal vielleicht 70 km) unter der Oberfläche (*McKinnon und Melosh, 1980*). Die Autoren geben für die Zeit, in der das Valhalla-Becken entstand, einen Wärmefluss von $\approx 20 \text{ mW/m}^2$ an. Der thermale Gradient in dieser Zeit betrug vermutlich $3 - 5^\circ/\text{km}$ (*Golombek und Banerdt, 1994*). Je nach Impakt-Chronologiemodell bestand dieser Zustand vor etwa 4 Ga (*Model I*) oder vor nur etwa 2 Ga (*Model IIa*).

Beim Einschlag des Lofn-Impaktors bildete sich - von Scarp-Segmenten abgesehen - keine Multi-ringstruktur. Zum Zeitpunkt des Lofn-Impakts bestand weiterhin eine Unterteilung der obersten Zehnerkilometer in eine untere plastische Schicht und eine obere spröde Schicht, die das Projektil, oder mehrere nacheinander auftreffende Projektile, durchschlug (*Schenk und Moore, 1999; Greeley et al., 2000b*). Dies folgt aus der Existenz von Palimpsesten oder Dom-Kratern (*Moore et al., 2004; Schenk et al., 2004*).

Schenk und Moore (1999) nehmen an, dass das Fehlen einer Valhalla ähnlichen Multiringstruktur bei Lofn auf eine Verfestigung vor allem der äußeren, spröden Lithosphäre mit der Zeit hindeutet. In *Model I* hätte sich diese Entwicklung innerhalb von 120 Millionen Jahren, der Altersdifferenz beider Becken vollzogen, in *Model IIa/IIb* dagegen innerhalb von ca. 1 Milliarde

⁶²Hierunter ist der gesamte Durchmesser des Ringsystems zu verstehen, nicht des nominellen Kraterrandes des Beckens.

Jahre (ohne Berücksichtigung einer möglichen Apex-Antapex-Abhängigkeit der Einschlagsrate). Da innere Wärmequellen in Callisto weitgehend fehlen und auch die Gezeitenkräfte nicht ausreichen, um den noch zur Zeit der Valhalla-Entstehung bestehenden thermischen Zustand aufrecht zu erhalten, könnten die höhere Impaktrate der Frühzeit genügend Energie geliefert haben, um eine weitergehende Verfestigung der obersten Krustenschichten zu verhindern oder zu verlangsamen.

Ein weiterer Grund in den morphologischen Unterschieden zwischen Lofn und Valhalla könnte aber einfach nur darin bestehen, dass die Energie des Lofn-Impaktors, unabhängig von der Schichtung in eine spröde und duktile Zone bis in etwa 20 km Tiefe, nicht ausreichte, um die in Valhalla beobachteten Deformationen hervorzurufen. Die Ursache der morphologischen Unterschiede in einer Verfestigung der Kruste mit der Zeit zu sehen würde im Rahmen von *Model IIA/IIb* sogar einen Widerspruch beinhalten, da *Zahnle et al.* (1998 und 2003) annehmen, die beiden Becken seien, trotz unterschiedlicher Kraterhäufigkeiten, wegen ihrer Lage zum Apex und der möglichen Abhängigkeit der Einschlagsraten von der Lage zum Apex in etwa gleich alt. Die möglichen Ursachen für die Unterschiede zwischen Valhalla und Lofn sind damit (1) eine (schnelle) Verfestigung der Kruste (verträglich mit *Model I*; mit *Model IIA/IIb* nur bei Annahme Apex-unabhängiger Einschlagsraten), oder (2) Unterschiede in der Energie der beiden Einschläge (verträglich mit beiden Modellen).

Welche genaue Morphologie das Lofn benachbarte Becken Heimdall aufweist, muß mit Bilddaten einer zukünftigen Mission geklärt werden. Zumindest in den SSI- und Voyager-Daten scheint Heimdall in der Morphologie Lofn ähnlich zu sein. Die Frage nach einem Doppelschlag Heimdall-Lofn lässt sich mit den vorliegenden Bilddaten nicht klären. Das für Heimdall abgeleitete Modellalter von etwa 4.05 Ga (*Model I*) ist vermutlich zu hoch. Es konnte nur eine relativ kleine Fläche gemessen werden, die zudem von Lofn-Sekundärkratern teilweise überdeckt ist.

Die Wirkung von Erosion und Abtragung ist in den Kraterverteilungen bei Durchmessern unter 1 bis 2 km festzustellen. Nur an wenigen Stellen lässt sich die ursprüngliche steile Produktionsverteilung durch Messung der stark abgetragenen, teilweise kaum noch kenntlichen prä-Valhallischen Kraterstätten rekonstruieren. Meist werden die Verteilungen aber zu den kleineren Kratern im Subkilometerbereich flacher. In einigen Gebieten lassen sich eventuell mögliche Episoden schnellerer und langsamerer Erosion bzw. Erosion unterschiedlich widerstandsfähiger Schichten nachweisen. Insgesamt tendieren die Verteilungen dazu, bei kleineren Durchmessern wieder auf eine mehr oder weniger gleich steile Verteilung mit ähnlichen Kraterhäufigkeiten (und demzufolge Altern) zu fallen. Dies wird sich, wie weiter unten noch näher erläutert werden wird, in den höchst aufgelösten Bilddaten aus verschiedenen Gebieten bestätigen.

Wie bereits erwähnt (vergl. Abschnitt 8.2.8), wird die weiter fortgeschrittene Erosion auf Callisto im Vergleich etwa zu Ganymed dem Vorhandensein von Kohlendioxid zugeschrieben (*Moore et al.*, 1999). CO₂ wurde spektral nachgewiesen (vergl. *McCord et al.*, 1998), allerdings für die oberflächen-nächste Schicht von höchstens einem Millimeter. Da eine oberflächliche Schicht von nur 1 mm nicht ausreicht, um wesentlich zur Abtragung beizutragen, muß sich ein weitaus größeres Reservoir in der Kruste befinden (*Moore et al.*, 1999; *Hibbitts et al.*, 2000, 2002). NIMS-Beobachtungen zeigten, dass CO₂ als Bestandteil des dunklen Nicht-Eismaterials, vermutlich in

Tonmineralen, Schichtsilikaten und kohlig-chondritischen Bestandteilen, außerdem in Klathraten zusammen mit Wassereis vorkommen könnte und bei Einschlägen freigesetzt wird (ebd.).

Beim gegenwärtigen Kenntnisstand über die Oberflächenbeschaffenheit ist es nicht möglich, genaue Erosionsraten zu bestimmen: Die Dicke des dunklen Verwitterungsrückstandes, der das hellere eishaltige Material überlagert, ist nicht genau bekannt, ebensowenig die genauen thermalen Trägheiten des dunklen und hellen Materials (*Moore et al.*, 1996, 1999). Messungen der thermischen Eigenschaften (Gang der Oberflächentemperatur über einen Callisto-Tag verteilt) zeigten Inhomogenitäten in den thermischen Eigenschaften. Entweder sind wenigstens zwei Materialien mit unterschiedlichen thermischen Trägheiten (a) horizontal verteilt (*Spencer*, 1987), oder (b) vertikal geschichtet, wobei eine nur wenige Millimeter dicke Schicht niedriger thermischer Inertia eine Schicht höherer Inertia überlagert (*Morrison und Cruikshank*, 1973).

Moore et al. (1999) konnten näherungsweise mögliche Abtragungsraten unter der Annahme einer vertikalen Schichtung in Material niedriger und höherer thermale Trägheit modellieren. Ihre Modellierung basiert auf einer thermalen Inertia von weniger als $50 \text{ Jm}^{-2}\text{s}^{-1/2}\text{K}^{-1}$ für das dunkle, wenig kompaktierte feinkörnige Material (wenige μm Korndurchmesser). Bei einer reinen Wassereisoberfläche würde die Abtragungsrate bei einer nur 1 mm dicken überlagernden Schicht dunklen Materials auf dem Eis noch etwa 1 km pro Milliarde Jahre betragen, bei einer Überdeckung von etwa 10 cm fällt dieser Wert bereits aber auf weniger als 1 m pro Giga-Jahr. Lediglich CO_2 kann selbst unter einer mehrere Zehnermeter mächtigen dunklen Schicht mit einer Rate von mehreren 100 m pro Giga-Jahr sublimieren (ebd.). Die Autoren diskutierten daher die bedeutende Rolle von Kohlendioxid als wesentlichen Bestandteil in der Kruste, vor allem seine hohe Flüchtigkeit, um die stark abgetragenen Oberflächenformen auf Callisto zu erklären (ebd.).

Aus diesen Angaben und aus einer Mindestmächtigkeit des dunklen Verwitterungsrückstandes von 100 Metern und mehr (Auffüllung von größeren Kratern fast bis zum Kraterrand) lässt sich ablesen, dass selbst bei Anwesenheit von CO_2 im Krustenmaterial eine Größenordnung von immer noch mindestens 1 Giga-Jahr erforderlich ist, um einige hundert Meter des hellen, topographisch hoch gelegenen Materials abzutragen. Die Erosionsraten auf Callisto verliefen daher eher langsam und sprechen bei den stark abgetragenen Oberflächenformen aus den beiden jüngsten Perioden der geologischen Geschichte für Alter in der Größenordnung von mindestens 2 bis 3 Milliarden Jahren als unterster Altersgrenze.

Ein weiterer Hinweis auf sehr langsame Erosionsraten kommt aus dem mit hoher Wahrscheinlichkeit mond-ähnlichen Einschlagsszenario. Die jüngsten im Gebiet des Valhalla-Beckens bei kleinen Kraterdurchmessern auf dem dunklen Material noch gemessenen Alter (sofern die Verteilung noch einer Produktionsverteilung entspricht) betragen in *Model I* etwa 3.5 bis 3.6 Ga. Das dunkle Material liegt damit seit der späten Valhallischen Epoche und dem Ende des LHB weitgehend unverändert durch nachfolgende Prozesse vor. Eine Korrelation höherer Erosionsraten mit einem höheren Impaktorfluss, gekoppelt mit einem erhöhten Wärmefluss aus dem Inneren, erscheint naheliegend. Durch Impakte wurde vermutlich CO_2 im Untergrund freigesetzt, das Prozesse der Sublimationsverwitterung beschleunigte (vergl. *Moore et al.*, 1999).

Der dunkle Verwitterungsrückstand ist in den beiden Varianten des Kometenmodells nur wenige hundert Millionen Jahre alt. Über einen derart langen Zeitraum müssten aber konstante Ero-

sionsprozesse auch im dunklen Gebiet nachweisbar sein. Die Kraterverteilung ist aber bei den kleinsten gemessenen Kratern steil, d.h. die Produktionsverteilung in diesem Durchmesserbereich wurde seit der Entstehung des dunklen Materials nicht oder nicht nachprüfbar verändert. Plausibler erscheint daher eher eine Kopplung höherer Erosionsraten an ein Einschlagsszenario mit einer höheren Einschlagsrate in der Frühzeit. Dafür könnten durchaus auch Kometen und Kuipergürtelobjekte verantwortlich gewesen sein, falls die Dissipationsrate von Kometen und KBOs aus dem Kuiper-Gürtel, wie von *Zahnle et al.* (1998) angemerkt, nicht proportional zu t^{-1} , sondern proportional zu höher negativen Exponenten verlief.

8.5. Asgardisches System

8.5.1. Typlokalität

Asgard ist mit einem äußeren Ringdurchmesser von etwa 1900 km das zweitgrößte noch gut erhaltene Multiringbecken auf Callisto (*Smith et al.*, 1979b; *Schenk*, 1995). Beim ersten gezielten Vorbeiflug Galileo's an Callisto (Orbits C3) wurde die SSI-Kamera erstmals auf Asgard ausgerichtet und nahm dabei eine Sequenz von vier Bildern mit 1.1 km/pxl Auflösung auf, die im Voyager-Kontext in Bild 8.2 (Abschnitt 8.2.2) dargestellt ist. Im weiteren Verlauf der Galileo-Mission erfasste eine Nord-Süd verlaufende Traverse (Orbit C10, Zielgebiet 10CSASGARD01, 1x12 footprint) die wesentlichen Details der strukturellen Zonen des Beckens mit 88 m/pxl Auflösung. Während der dreißigsten Umrundung mit dem insgesamt sechsten und letzten gezielten Vorbeiflug an Callisto (C30) blickte die SSI-Kamera noch einmal gezielt auf das Asgard-Becken, erfasste dabei aber nur einen sehr kleinen Ausschnitt einer Grabenstruktur in hoher Auflösung (Zielgebiet 10CSHIRES_02, 10 m/pxl).

Das Zentrum des Asgard-Beckens liegt bei einer Breite von 31° Nord und 140° West. Aus Abb. 8.2 in Abschnitt 8.2.2 geht hervor, dass sich (1) Asgard inmitten dunkler Kraterenebenen hoher Kraterdichte befindet, und dass (2) die Ringe Asgard's im Norden des Beckens weitgehend überdeckt sind, (a) durch jüngere Kraterenebenen und (b) durch mindestens ein post-Asgardisches Becken mit Namen *Utgard*. Dieses wird wiederum durch den hellen Strahlenkrater Burr überlagert.

Die wesentlichen morphologischen Merkmale des Asgard-Beckens sind im Übersichtsbild 8.33 dargestellt, einem Ausschnitt des SSI-Zielgebiets C3CSASGRNG01. Die Lage der im Orbit C10 aufgenommenen Traverse mit 88 m/pxl (Zielgebiet 10CSASGARD01) ist eingezeichnet, ebenso die Lage der in den folgenden Abbildungen 8.34 bis 8.38 gezeigten Detailansichten mit den charakteristischen geologischen Einheiten und Strukturmerkmalen des Beckens. Weiterhin ist die Lage des während des Orbits C30 mit 10 m/pxl Auflösung aufgenommenen sehr kleinen Ausschnitts (SSI-Zielgebiet 30CSHIRES_02) angegeben.

8.5.2. Strukturelle Zonen und geologische Einheiten des Asgard-Beckens

Die hoch aufgelöste Traverse der Zielgebiets 10CSASGARD01 erfasste (1) die drei strukturellen Zonen des Asgard-Beckens (vergl. *Bender et al.*, 1997b) und ihre Materialeinheiten, die die Formationen der **Asgard Group** bilden, (2) die Einheiten des stratigraphisch jüngeren Dom-Kraters Doh, d. h. die Schichtglieder der **Doh Formation**, und (3) die Asgard umgebenden Kraterenebenen. Asgard ist wie Valhalla in folgende drei strukturelle Bereiche aufteilbar, die sich jedoch im Detail von denen des größeren Beckens unterscheiden (*Schenk*, 1995; *Bender et al.*, 1997b; *Homan et al.*, 1998): (a) in helle, zentrale Ebenen (**Acb** in Bild 8.33), (b) in eine Zone mit Steilhängen und/oder Rücken (**Asr**), und (c) in eine äußere Zone mit Grabenstrukturen (**Aot**). Wie in Valhalla ist nur die Einheit *Acb* auch eine Materialeinheit.

1. Helle, bei regionaler Bildauflösung (1.1 km/pxl, C3CSASGRNG01) glatte Ebenen, kartier-

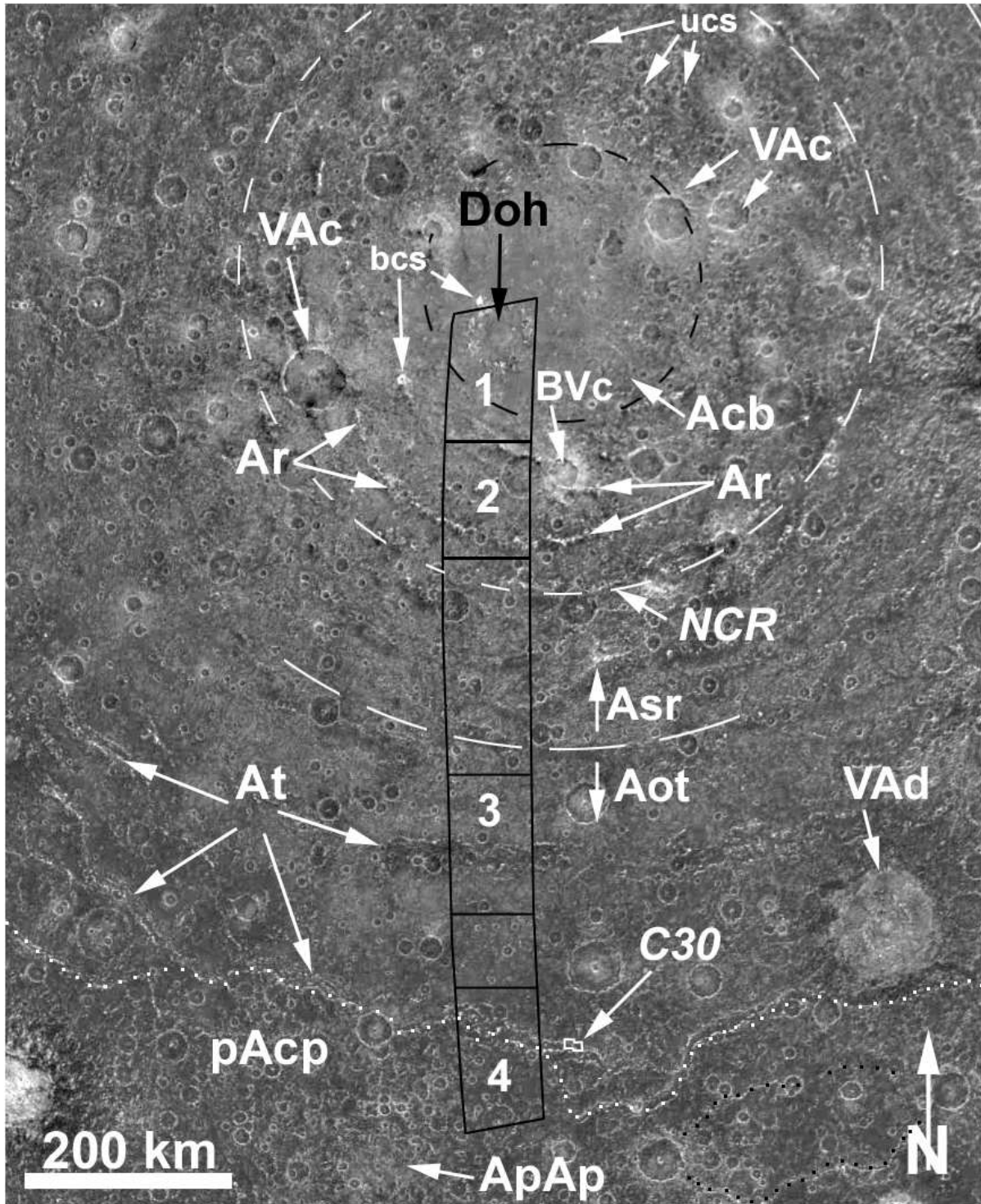


Abbildung 8.33.: Zentrum und südlicher Teil des Asgard-Beckens. Ausschnitt eines Mosaiks des Zielgebiets C3CSASGRNG01 (Bildauflösung 1.1 km/pxl, Bildnummern: C3C0020 bis C3C0023). Die Lage des Nord-Süd verlaufenden Zielgebiets 10CSASGARD01 (88 m/pxl) ist schwarz eingezeichnet, ebenso die Lage der in den Abbildungen 8.34 bis 8.38 gezeigten Details dieser Traverse (1 - 4), und die Lage eines weiteren hoch aufgelösten Mosaiks (Zielgebiet 30CSHIRES_02, 10 m/pxl). Weiß, kurz gestrichelt: nomineller Kraterdurchmesser (*NCR*); schwarz gestrichelt: wahrscheinliche Grenze der zentralen Ebenen; weiß, gepunktet: Grenze des Beckens zu den umgebenden Kraterebenen; schwarz, gepunktet: Grabenstrukturen in den umgebenden Kraterebenen. Weitere Erläuterungen siehe Text.

bar als **Acb - material of central bright plains**, kennzeichnen die innerste strukturelle Zone des Asgard-Beckens. Im Vergleich zum Zentrum Valhallas sind sie aber deutlich weniger ausgeprägt und schwer von den umgebenden Einheiten abzugrenzen. Jüngere Krater mit mehreren Zehnerkilometern Durchmesser überdecken diese Einheit weitgehend. Daher fehlt ein deutlicher Helligkeitsunterschied zur Umgebung. Die wahrscheinliche Grenze von *Acb* ist in Bild 8.33 schwarz gestrichelt eingezeichnet.

Auffallendster Krater nahe dem Beckenzentrum ist der Dom-Krater **Doh**. Die C3-Daten zeigen eine zentrale Aufwölbung von etwa 25 km Durchmesser, umgeben von einem kreisförmigen Kranz einzelner Massive mit ca. 65 - 70 km Durchmesser, um den sich ein helles, glattes Gebiet bis zu 110 km vom Zentrum erstreckt. *Bender et al.* (1997a) und *Homan et al.* (1998) merkten an, dass die helle Albedo der zentralen Ebenen Asgards zu einem wesentlichen Teil durch diesen Krater verursacht wird.

Bild 8.33 zeigt deutlich, dass Doh asymmetrisch zum Beckenzentrum liegt. Der Eindruck eines hellen Zentrums bei Asgard kommt somit weitgehend durch die Doh-Struktur und durch die Ejekta jüngerer Krater mit Durchmessern von 30 km und mehr zustande. Zusätzlich überlagern kleinere Krater, darunter auffallend helle mutmaßliche Sekundärkrater des jungen Strahlenkraters Burr (*bcs*, Abb. 8.33) oder auch von Tornarsuk (vergl. Bild 8.2, Abschnitt 8.2.2) den zentralen Bereich von Asgard.

Den Durchmesser der zentralen hellen Ebenen geben *Greeley et al.* (2000b) mit etwa 200 km an. Nimmt man ähnliche Durchmessererhältnisse der einzelnen Zonen wie in Valhalla an (vergl. *Iaquinta-Ridolfi und Schenk*, 1995) so folgt für *Acb* jedoch ein etwas größerer Durchmesser von ~ 280 km⁶³. Ein Kreis mit diesem Durchmesser ist in Bild 8.33 schwarz gestrichelt eingezeichnet.

Abbildung 8.34, der oberste der vier Detailausschnitte des Zielgebiets 10CSASGARD01, zeigt die Einheiten des Kraters Doh. Bei dieser Auflösung können in Doh mehrere Schichtglieder der **Doh Formation** unterschieden werden. Detailansichten dieser Einheiten sind in Bild 8.35 dargestellt (zu ihrer Lage siehe Bild 8.34). Der Krater Doh ist ein typischer Vertreter der Dom-Krater oder Penepalimpseste. Der innere, stark zergliederte Ring mit einem Durchmesser von 65 - 70 km stellt nicht den Kraterrand dar, sondern den Rand einer Zentralmulde (*central pit*). Der eigentliche Kraterrand von Doh ist durch einen weiteren, nicht an allen Stellen kontinuierlichen "Ring" von Massiven mit einem Durchmesser von ca. 130 - 140 km gekennzeichnet, vergleichbar der morphologisch ähnlichen Impaktstruktur Neith auf Ganymed (*Lucchitta und Ferguson*, 1988; *Wagner et al.*, 1998b; *Schenk et al.*, 2004).

Die *Doh Formation* umfasst folgende Schichtglieder, die nach Kraterzählungen und Modellaltern (siehe nachfolgenden Abschnitt 8.5.3) chronostratigraphisch der oberen Serie des Valhallischen Systems zugeordnet werden können:

- a) **Vdod - dome material:** Der Dom im Zentrum der Impaktstruktur (Abb. 8.34 und 8.35, 1) erhebt sich in einer Größenordnung von etwa 100 m über den Boden der

⁶³Aus dem Verhältnis von 4000 km (maximaler Durchmesser von Valhalla) und 600 km für die zentralen Ebenen ergibt sich ein Quotient von etwa 6.7. Daraus resultiert bei einem maximalen Durchmesser von 1900 km für Asgard ein Durchmesser der hellen Ebenen von etwa 280 km.

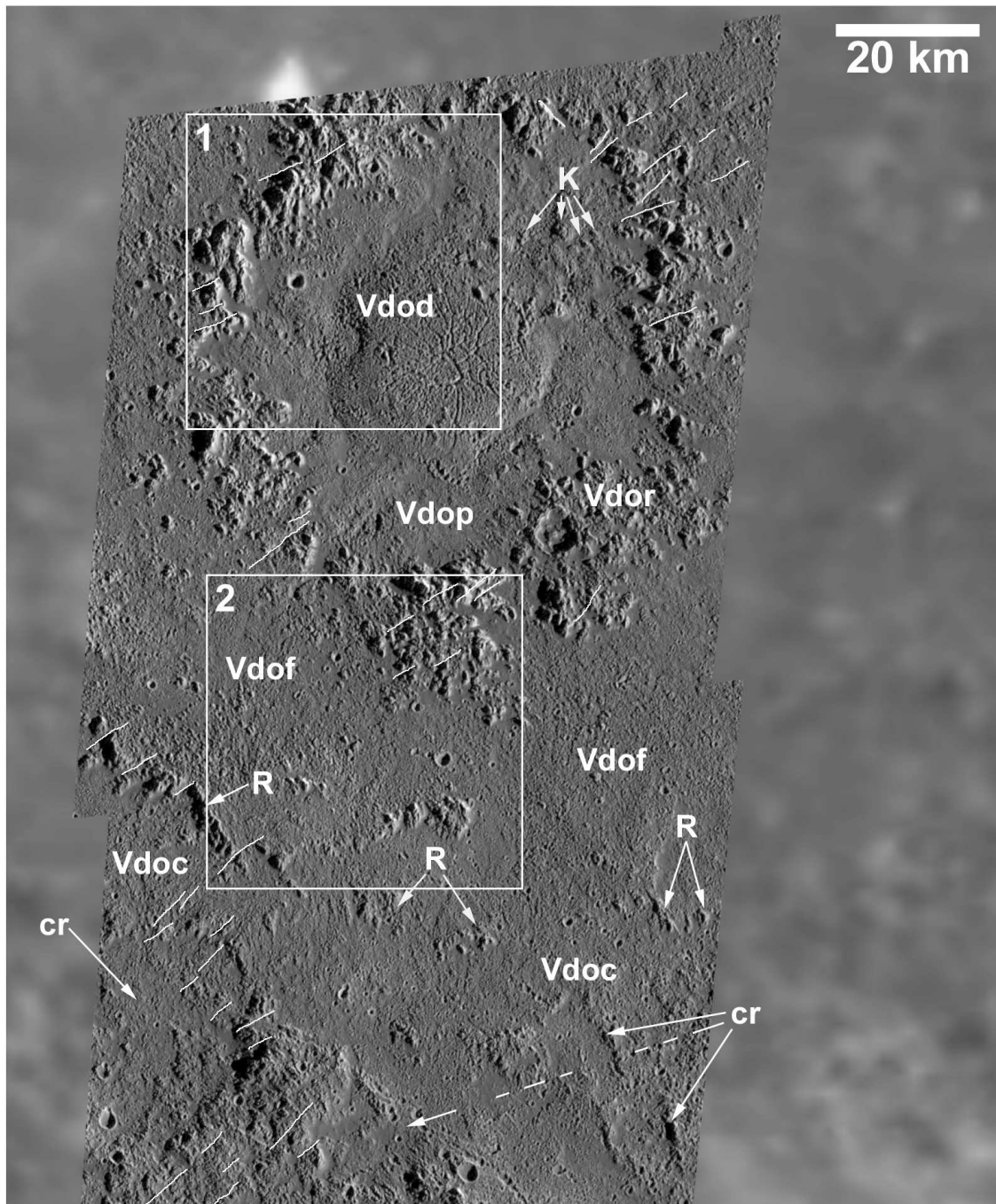


Abbildung 8.34.: Detailaufnahme 1: Dom-Krater Doh und *inner scarp zone* des Asgard-Beckens. Ausschnitt eines Mosaiks des SSI-Zielgebiets 10CSASGARD01 mit 88 m/pxl Auflösung, SSI-Bildnummern 10C0001 und 10C0002. Die beiden Quadrate kennzeichnen die im nachfolgenden Bild 8.35 vergrößerten Bereiche des Dom-Kraters Doh und seine geologischen Einheiten. Beschreibung der Einheiten und Symbole siehe Text.

Zentralmulde (Abschätzung aus Schattenlängen). Im Zentrum des Domes befindet sich eine Spalte in Form eines geschlossenen Polygons mit etwa 3 km Durchmesser, von der weitere radiale Spalten ausgehen, die sich fast bis zum Fuß des Domes hinziehen.

- b) **Vdop - central pit floor material:** Das Material des Zentralmuldenbodens erscheint glatter als das Dom-Material. Im nordöstlichen Bereich der Mulde treten zwischen Dom und Muldenrand flache Kuppen mit mehreren Kilometern Ausdehnung auf (**K**, Abb. 8.34). Ähnliche Formen sind auch in anderen Dom- und Zentralmuldenkratern zu unterscheiden (vergl. *Wagner et al.*, 1998b).
- c) Einige auffallend glatte Bereiche mit Ausdehnungen von wenigen Kilometern wurden als eigene Einheit **Vdos - smooth pit and crater floor material** kartiert (Bild 8.35, oben). Derartige glatte "patches" sind vorwiegend an der Grenze zwischen dem Material des Muldenbodens und dem Muldenrand zu beobachten, dazu auch noch an einigen Stellen des Kraterbodens.
- d) **Vdor - material of central pit rim:** Ein maximal 10 km breiter Kranz aus Massiven umgibt den Dom und die Zentralmulde des Kraters. Die Breite des stark zergliederten Muldenrandes ist variabel, mit der breitesten Stelle im südöstlichen Sektor. Die einzelnen Massive erreichen Höhen von mehreren hundert Metern (Messungen von Schattenlängen). Einige Ränder einzelner Massive oder von Gruppen von Massiven sind mit Vorzugsrichtungen von NE-SW bis ENE-WSW angeordnet (weiße Linien in Bild 8.34, Pfeile in 8.35, 1).
- e) Das Gelände, das den Muldenrand umgibt, ist eben, erscheint aber rauh durch zahllose kleinere Kuppen oder Hügel mit Abmessungen von weniger als 1 km. An den durchbrochenen Stellen des Muldenrandes geht der Boden der Mulde ohne deutlichen Unterschied in Morphologie oder Albedo in den Kraterboden (**Vdof - crater floor material**) über (Abb. 8.35, 2). Vereinzelt lassen sich auch hier einzelne glatte Bereiche (Einheit *Vdos*) auskartieren. Albedolineamente mit Vorzugsrichtungen von SW-NE sind hier ebenfalls festzustellen (schwarze Linien in Abb. 8.35, 2).
- f) Etwa 40 km vom Muldenrand entfernt erheben sich konzentrisch zum Kraterzentrum Hügelketten über dem Kraterboden (**R** in den Abbildungen 8.34 und 8.35, 2). Wie ein Vergleich mit ähnlichen Kratern, beispielsweise Neith (Ganymed) zeigt, repräsentieren sie den eigentlichen Kraterrand (*Wagner et al.*, 1998b; *Schenk et al.*, 2004). Der Rand ist aber nicht vollständig, sondern erscheint an mehreren Stellen auf Strecken von mehreren Zehnerkilometern unterbrochen (vergl. Abb. 8.34). Auch dies lässt sich in anderen ähnlichen Dom-Kratern (z.B. Neith, Ganymed) beobachten (ebd.). Innerhalb des Randes befinden sich noch auf dem Kraterboden weitere, den Kraterrandsegmenten ähnliche Massive, die möglicherweise Reste eines inneren Ringes darstellen könnten.
- g) Außerhalb des Kraterrandes ändert sich die Textur nur wenig. Ein radiales Muster, das auf Ejekta hindeutet, ist nicht festzustellen. Hierin liegt ein Unterschied zu ähnlichen Kratern wie etwa Neith, bei dem die kontinuierlichen Ejekta durch radiale Strukturen außerhalb der Kraterrandsegmente zu erkennen sind (*Wagner et al.*, 1998b). Die Einheit **Vdoc - continuous ejecta material** ist ohne markanten Kraterrand schwieriger vom Kraterboden abzugrenzen. Einziger Hinweis auf die Wirkung konti-

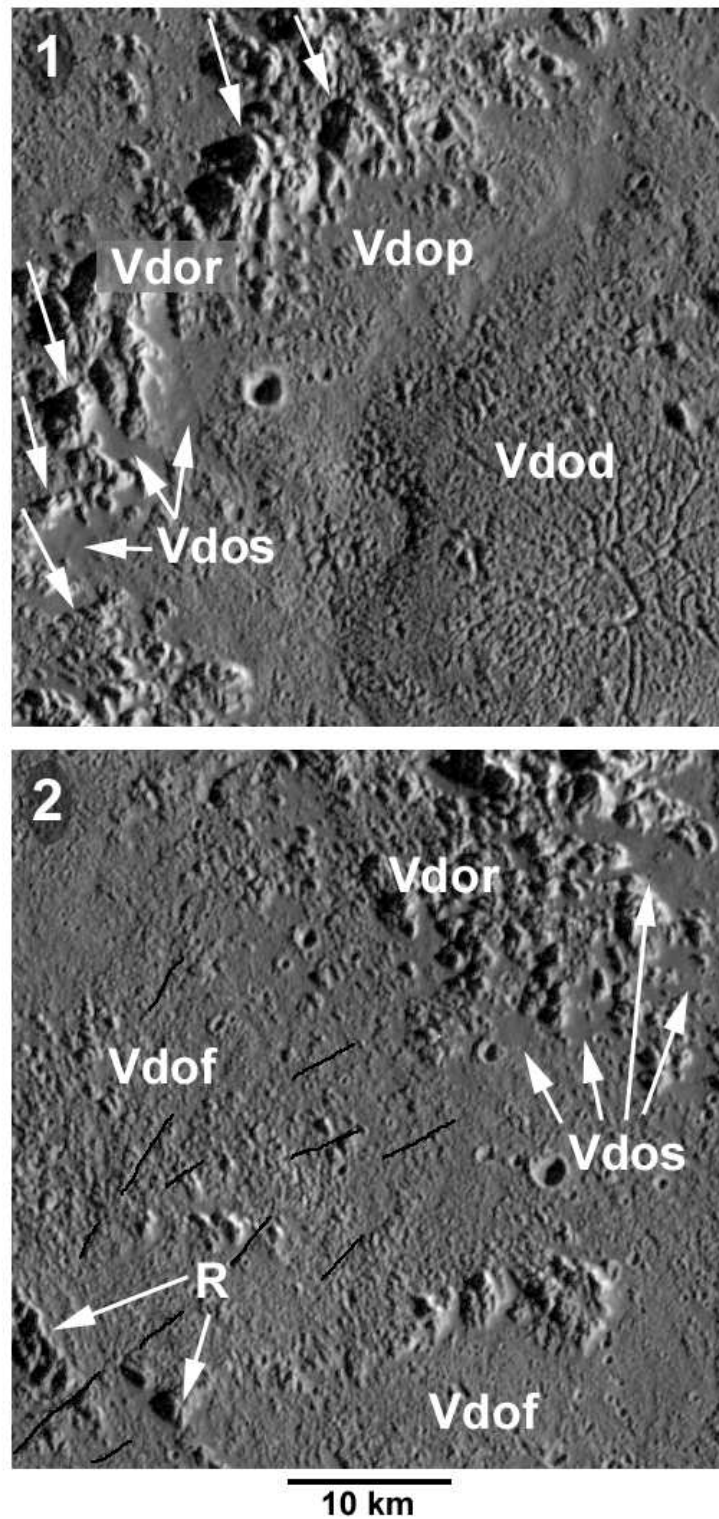


Abbildung 8.35.: Geologische Einheiten des Dom-Kraters Doh. **1** zentrale Aufwölbung (Dom; **Vdor**), umgebender Boden der zentralen Mulde (**Vdop**), glattes Material (**Vdos**) und Rand der zentralen Mulde (**Vdor**); **2** Rand der zentralen Mulde (**Vdor**), Kraterboden (**Vdof**), glattes Material (**Vdos**), Kraterrand (**Vdoc**) und kontinuierliche Ejekta (**Vdoe**). Hoch vergrößerte Ausschnitte von Bild 8.34, SSI-Bildnummer 10C0001. Erläuterungen der Symbole im Text.

nuierlicher Ejekta sind eine Reihe von stark zerstörten und/oder überdeckten Kratern oder Kraterriuen (**cr** in Bild 8.34 und 8.36).

Die kontinuierlichen Ejekta von Doh überdecken den innersten erkennbaren "Ring" des Asgard-Beckens, gekennzeichnet durch einzelne Massive (**R1** in Bild 8.36). Eine markante, etwa entlang des nördlichen Hangs verlaufende Kraterkette (**cs₃** in Bild 8.36) wurde auf endogene Prozesse bei der Entstehung des Asgard-Beckens zurückgeführt. Es wurde vermutet, dass (a) Oberflächenmaterial durch "Drainage"-Prozesse kollabierte und eine Kette von Gruben (*pits*) erzeugte, oder (b) dass Ausgasungen diese Formen hervorriefen (*Greeley et al.*, 2000b, und Zitate darin). Beiden Interpretationen wird hier nicht gefolgt. Ein Blick auf den niedriger aufgelösten Kontext zeigt deutlich, dass es sich um eine Kette von Sekundärkratern handelt, die von einem *c₃*-Krater (= *BVc*) ausgehen (in den Abbildungen 8.33 und 8.36 mit **c₃** markiert).

Die kontinuierlichen Ejekta von Doh sind deutlich abgrenzbar. Die Grenze verläuft in Bild 8.36 entlang der oberen gestrichelten weißen Linie. Außerhalb der Ejekta ist die Kraterhäufigkeit höher. Die äußere Grenze der Doh-Ejekta verläuft durch einen etwa 40 km großen Krater der Erosionsklasse *c₁* (Bild 8.36). Weitere Sekundärkrater des außerhalb von 10CSASGARD01 gelegenen *c₃*-Kraters befinden sich auf den Doh-Ejekta im Inneren dieses *c₁*-Kraters (Bild 8.36, **cs₃**).

Zwischen Mulden- und Kratertrand und in den kontinuierlichen Doh-Ejekta sind Albedolineamente zu identifizieren. Sie sind nicht besonders auffallend, lassen sich aber durch Kantenverstärkung (Hochpassfilter) herausheben. Ihre Haupttrichtung verläuft etwa NE-SW bis ENE-WSW (Abb. 8.34, 8.35 und 8.36, schwarze und weiße Linien). Dieses Muster geht nicht radial von Doh aus. Ähnliche Vorzugsrichtungen sind in weiteren Gebieten festzustellen (vergl. z. B. Abschnitt 8.4.6).

- h) Außerhalb der kontinuierlichen Ejekta können einige Gruppen von mehrere Kilometer großen Kratern als Sekundärkrater von Doh interpretiert werden (**Vdcs** in Abb. 8.36). Ein etwa 15 km großer Krater (**c₂** (= *VAc*) in Bild 8.36) liegt genau auf der Grenze der kontinuierlichen und diskontinuierlichen Ejekta von Doh und stellt einen nach Doh entstandenen jüngeren Primärkrater dar.

2. Die Benennung der nächsten strukturellen Zone des Asgard-Beckens (*Asr*) ist nicht einheitlich. *Klemaszewski und Greeley* (2000) und *Greeley et al.* (2000b) bezeichnen die an die hellen Ebenen (*Acb*) anschließende Zone als **inward-facing scarp zone**, *Homan et al.* (1998) als **sinuous and arcuate ridge zone - Asr**. Die Detailansicht 8.36 stützt eher die Ansicht der letztgenannten Autoren. Die Lage dieser Zone ist in Bild 8.33 durch **Asr** angegeben⁶⁴.

Beim ersten außerhalb der Doh-Ejecta liegenden Rücken (**R2** in Abb. 8.36) entsteht der Eindruck eines nach innen gerichteten Steilhangs, da der Nordhang steiler erscheint als der Südhang. Soweit erkennbar, liegt das Material nördlich und südlich von **R2** (ebenso der nach außen anschließende Rücken) auf gleicher Höhe. Stereo-Anaglyphenbilder zwischen

⁶⁴In der auf Grundlage von Voyager-Daten erstellten älteren geologischen Karte von Callisto (*Bender et al.*, 1997b) wurden die drei strukturellen Zonen Asgards mit *ac* (*central materials*), *ai* (*inner ring materials*), und *ao* (*outer ring materials*) bezeichnet.

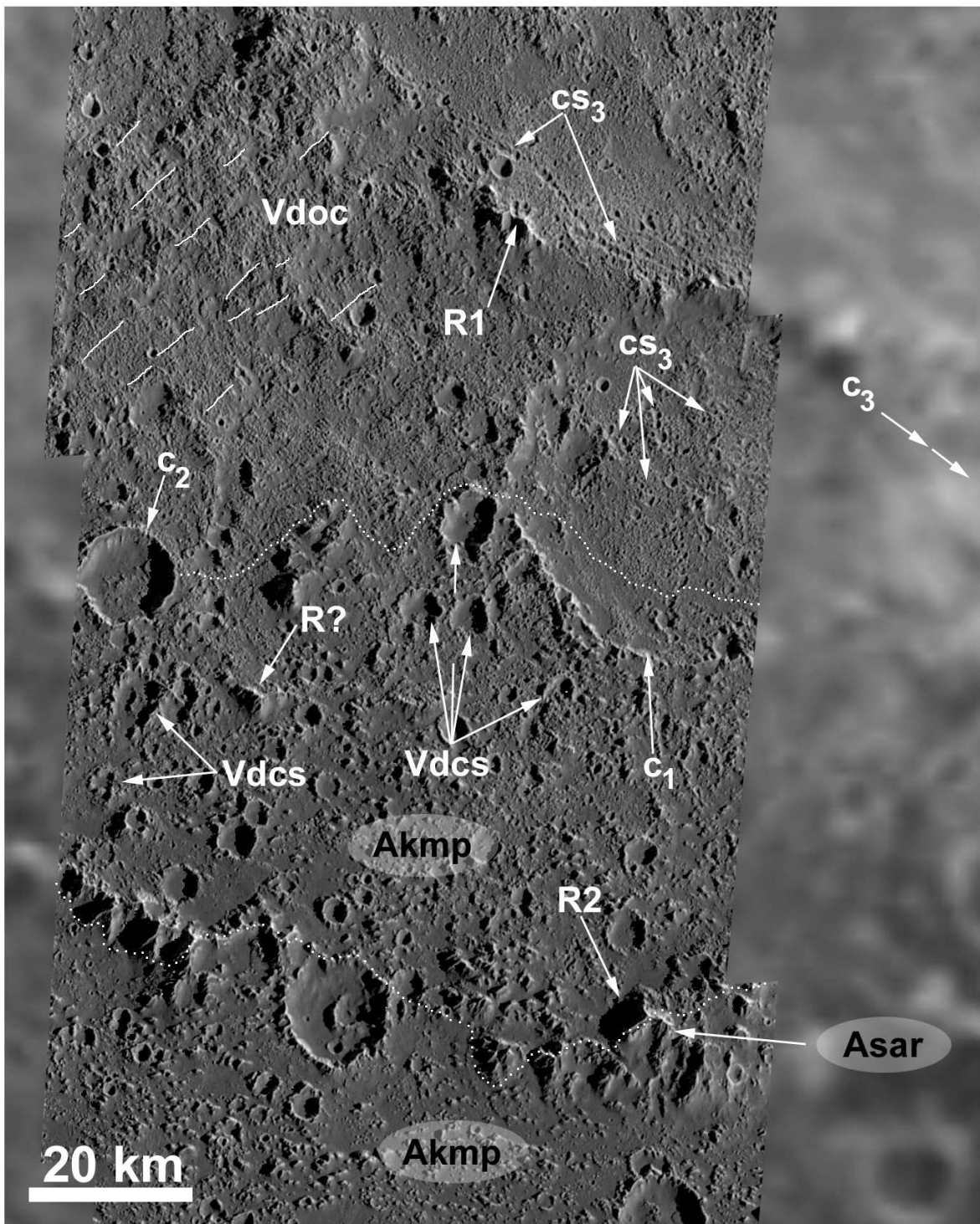


Abbildung 8.36.: Detailaufnahme 2: Doh-Ejekta und *inner scarp zone* des Asgard-Beckens. Ausschnitt des SSI-Zielgebiets 10CSASGARD01 (88 m/pxl Auflösung, SSI-Bildnummern 10C0002, 10C0003 und 10C0004). Zur Lage dieser Detailaufnahme siehe Bild 8.33 (Die beiden Detailansichten 8.34 und 8.36 überlappen sich). Weitere Erläuterungen siehe Text.

den Daten des Orbits C10 und C3 sind wegen des hohen Auflösungsunterschieds (88 m/pxl gegenüber 1.1 km/pxl) nicht herstellbar.

Die mittlere der drei strukturellen Zonen Asgards (*Asr*, (vergl. *Homan et al.*, 1998) ist, abgesehen von einzelnen größeren Kratern unterschiedlichen Erosionszustandes, gekennzeichnet durch die in die *Asgard Group* einzuordnenden Formationen (1) **Asar - sinuous and arcuate ridge material** d. h. in das eigentliche Material der Rücken, und (2) in eine Einheit von einzelnen Massiven oder Gruppen von Massiven, die sich aus einem weitgehend glatten, dunklen Material erheben, kartiert als (**Akmp - plains material of knobs and massifs**). Die Rücken der Einheit *Asar* sind bis zu 8 km breit und bis zu 2 km hoch (Messung von Schattenlängen), gehören damit zu den höchsten Erhebungen auf Callisto (*Greeley et al.*, 2000b). Schuttfächer am Fuß der Rücken sind nicht nachweisbar.

Im weiter nördlich gelegenen, im Zielgebiet 10CSASGARD01 nicht erfassten Teil des Asgard-Beckens sind die konzentrischen Rücken nicht festzustellen. Auswurfsmassen des jüngeren Beckens Utgard im Nordosten Asgards haben hier sowohl Rücken als auch Grabenstrukturen zerstört oder weitgehend überdeckt. Cluster von mehrere Kilometer bis ca. 15 - 20 km großen Kratern sind mit großer Wahrscheinlichkeit Sekundärkrater des Utgard-Beckens (**ucs** in Bild 8.33)⁶⁵.

Die Zone der Rücken ist etwa 300 - 350 km breit. Der Übergang zur nächsten äußeren Zone mit Grabenstrukturen (**outer trough zone - Aot**) befindet sich etwa an der in Bild 8.33 mit einem kurzen Kreisbogen (**Asr** und **Aot**) gekennzeichneten Stelle. Der von *Iaquinta-Ridolfi und Schenk* (1995) bei einem Durchmesser von etwa 625 km vermutete nominelle Kraterdurchmesser des Asgard-Beckens könnte mit einem relativ unauffälligen Rücken zusammenfallen, der lediglich im südwestlichen Sektor des Beckens innerhalb der Zone *Asr* nachzuweisen ist (Bild 8.33, bezeichnet mit **NCR**).

3. Grabenstrukturen der *outer trough zone* (**Aot**, Bild 8.33) setzen etwa 440 km vom Zentrum Asgard's entfernt ein. Ähnlich Valhalla sind die Ränder der Gräben in niedriger aufgelösten Daten hell und erwecken den Eindruck eines Paares von Bergrücken, die sich nur wenig über das Gelände erheben und einen etwas dunkleren Bereich umschließen (*Allemand und Thomas*, 1991). Der Vergleich mit Valhalla zeigt, dass es sich dabei nicht um einen reinen Albedoeffekt, sondern tatsächlich um Vertiefungen zwischen den beiden hellen Rändern handelt (*Schenk*, 1995; *Bender et al.*, 1997b; *Greeley et al.*, 2000b). Grabenböden und helle Ränder der Gräben werden hier unter der Einheit **Agf - material of graben floor** zusammengefasst.

Asgard und Valhalla weisen in ihren strukturellen Merkmalen Ähnlichkeiten auf, die Unterschiede zwischen den beiden Becken liegen aber insbesondere im unterschiedlich weit fortgeschrittenen Erosionszustand: (1) Die durchschnittliche Breite der Gräben ist mit 10 bis 20 km ähnlich. (2) Die Abstände zwischen den eindeutig erkennbaren Gräben sind ebenfalls ähnlich. (3) Kürzere, radial zum Beckenzentrum verlaufende Rücken wie in Valhalla sind in Asgard nicht vorhanden. (4) Die Ränder der Asgard-Gräben sind weniger

⁶⁵Utgard ist noch nicht genau datiert. Die relativ niedrige Bildauflösung (1.1 km/pxl), ein schräger Blickwinkel, ein dadurch bedingtes Foreshortening und die weitgehende Überdeckung durch den jungen Strahlenkrater Burr und seine Ejekta machen eine Messung aufgrund der kleinen verfügbaren Fläche schwierig. Als sicher gilt die Zuordnung zur Palimpsesteinheit *VAp* (vergl. Abschnitt 8.4.4).

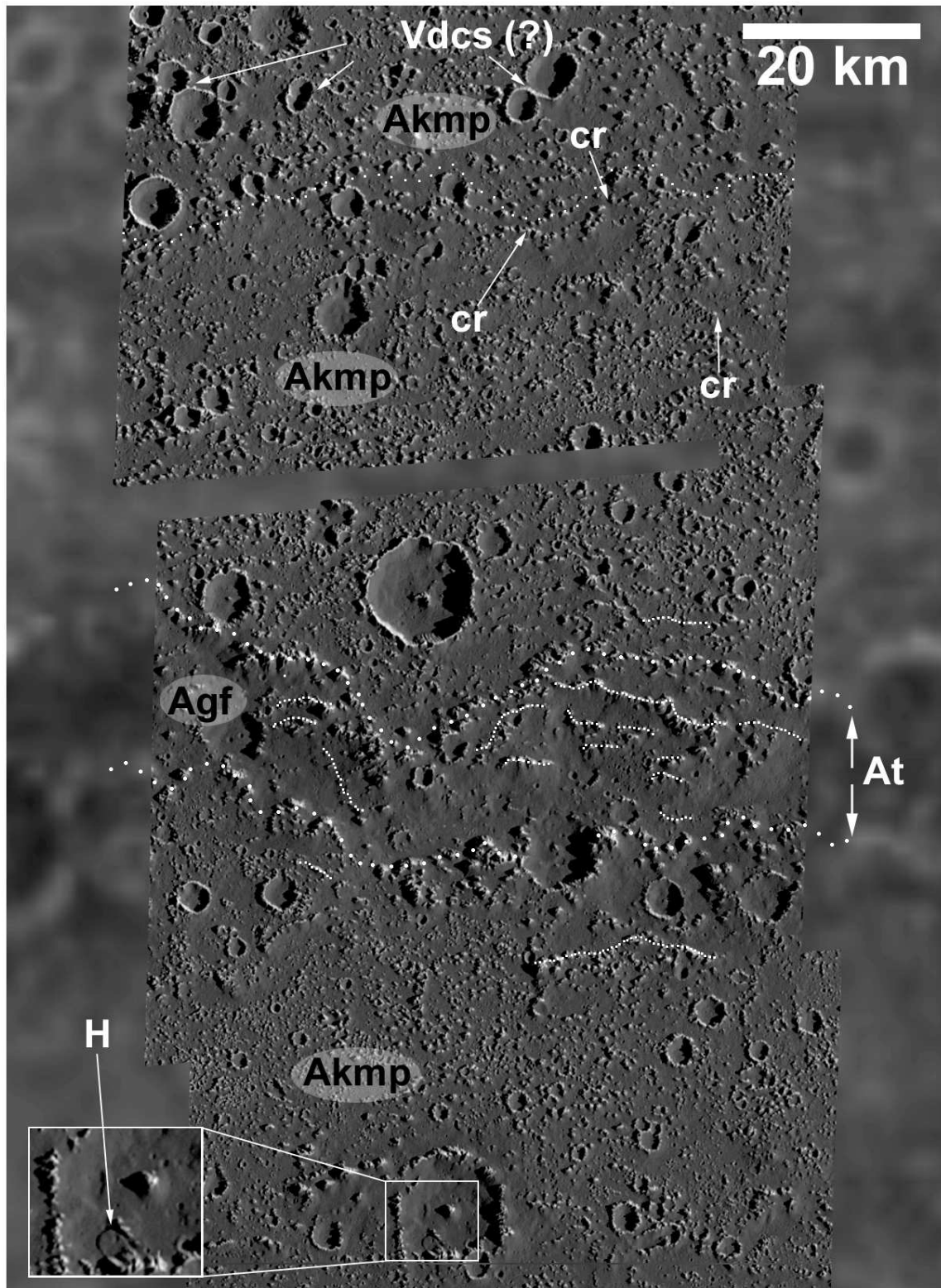


Abbildung 8.37.: Detailaufnahme 3: äußere Grabenzzone (*outer trough zone*) des Asgard-Beckens. Ausschnitt des SSI-Zielgebiets 10CSASGARD01 (88 m/pxl Auflösung, SSI-Bildnummern 10C0007, 10C0008 und 10C0009). Zur Lage dieser Detailaufnahme siehe Bild 8.33. Eine lobenförmige Ablagerung (Hanggrutsch; vergl. *Chuang und Greeley, 2000*) ist am unteren Bildrand herausvergrößert (**H**). Weitere Erläuterungen im Text.

scharf als die Valhallas. Neben den Kraterhäufigkeiten ist dies ein weiteres Indiz für das unterschiedliche Alter der beiden Becken.

In der hohen Auflösung (88 m/pxl) der Asgard-Traverse 10CSASGARD01 erscheint das Gebiet zwischen den Grabenstrukturen nicht glatt, sondern ist - ähnlich wie die innere Zone der Bergrücken - geprägt durch helle, kegelförmige Massive und Gruppen von Massiven, die aus einer dunklen, glatten Matrix ragen (Detailbilder 8.36 und 8.37). Im Wesentlichen ist die Einheit *Akmp* hier wiederzufinden. Abmessungen und Anordnung der Massive verändern sich jedoch von innen nach außen: Die weiter innen im Becken gelegenen Kegel erscheinen meist höher, größer mit Abmessungen von mehreren Hundert Metern bis zu 2 km, und haben größere Abstände voneinander. Die weiter außen gelegenen Kegel und Massive sind etwa ab der obersten gepunkteten Linie in Bild 8.37 niedriger, kleiner (meist unter 1 km) und dichter gepackt. Abweichungen von diesem Trend sind aber an einigen Stellen nachzuweisen.

Mancherorts ordnen sich die Kegel ringförmig oder halbkreisförmig an und sind als Reste stark abgetragener Krater zu interpretieren (**cr** in Bild 8.37). Die im oberen Teil des Detailbildes 8.37 befindlichen Kratergruppen könnten Cluster von Sekundärkratern sein, die vom Dom-Krater Doh herrühren (**Vdcs** (?)).

Zwei etwa 20 km voneinander entfernt liegende, annähernd lineare Ketten von Massiven, zwischen denen sich nur wenige der Kegel befinden, ziehen sich etwa durch die Mitte der Detailaufnahme 8.37 (angegeben durch weiße Punktensignatur). Im Kontext der C3-Daten ist an dieser Stelle eine der Grabenstrukturen des Beckens zu lokalisieren (**At** in Bild 8.37). Aus den C10-Daten geht hervor, dass dieser Graben nicht besonders tief ist, aus Schattenmessungen allenfalls 300 m. Leider lässt es der hohe Auflösungsunterschied zwischen den beiden Bilddatensätzen nicht zu, ein Anaglyphenbild oder ein digitales Geländemodell herzustellen, um die Tiefe des Grabens direkt zu messen.

Vermutlich besitzt Asgard wie Valhalla ein System grabenrand-paralleler Rücken innerhalb und außerhalb der Grabenränder. Diese Strukturen sind hier wesentlich schwerer nachzuweisen und sind wahrscheinlich bereits sehr stark abgetragen. Sie sind in Bild 8.37 mit kleiner engständiger Punktensignatur angegeben. Besonders die Rücken außerhalb der Grabenränder sind in Asgard, falls je vorhanden, kaum noch erkennbar.

Am untersten Rand des Detailbildes 8.37 befindet sich eine lobenförmige, nahezu kreisrunde Ablagerung mit einem Durchmesser von etwa 2 - 3 km unmittelbar am inneren Kratertrand (herausvergrößert, mit **H** bezeichnet). Ähnliche Formen sind in Kratern an anderen Stellen zu beobachten. Ihre Durchmesser schwanken zwischen etwa 2 km und 10 km (*Chuang und Greeley, 2000*). Deutliche Schatten zeigen, dass sie steil zum umgebenden Gelände abfallen. *Chuang und Greeley (2000)* fanden für diese Formen durchschnittliche Mächtigkeiten von 90 Metern. Obwohl das Material plastisch verformt zu sein scheint, vermuteten die Autoren einen Verlagerungsprozess ähnlich terrestrischen Bergstürzen (*dry-rock avalanches*) ohne Beteiligung von Wasser.

4. **pAcp - dark cratered plains:** Der Übergang vom Asgard-Becken zu den umgebenden Kraterebenen ist scharf, erkennbar an einem deutlichen Wechsel in der Kraterhäufigkeit (Abb. 8.33 (Grenze gepunktet), und 8.38). An der Übergangsstelle befindet sich der äußerste noch mehr oder weniger als Kreis geschlossene vorhandene Graben. In der hoch auf-

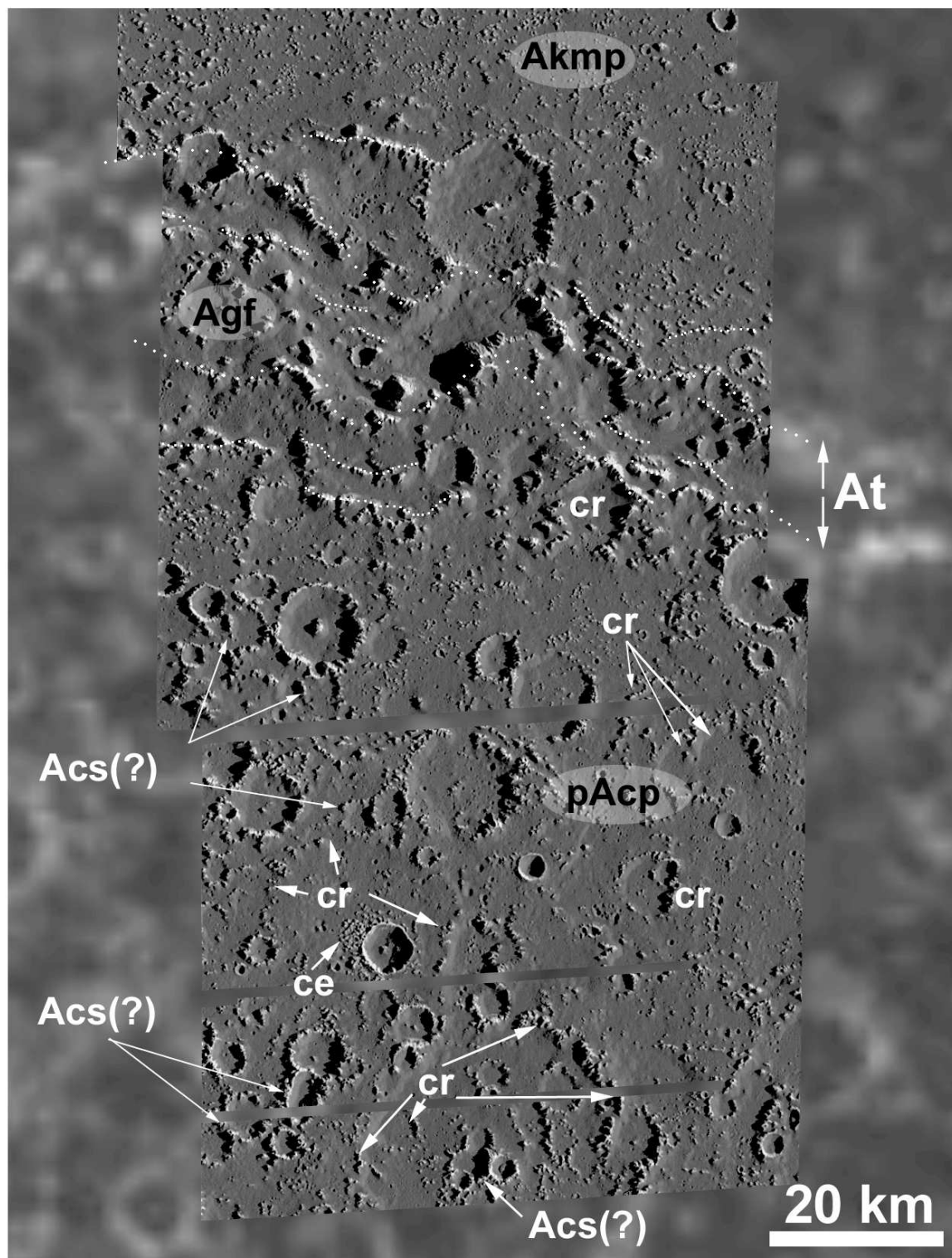


Abbildung 8.38.: Detailaufnahme 4: äußere Grabenzone (*outer trough zone*) des Asgard-Beckens und Kraterebenen. Ausschnitt des SSI-Zielgebiets 10CSASGARD01 (88 m/pxl Auflösung, SSI-Bildnummern 10C0010, 10C0011 und 10C0012). Zur Lage der Detailaufnahme siehe Bild 8.33. Weitere Erläuterungen siehe Text.

gelösten Traverse (10CSASGARD01) erscheint er tiefer zu sein und steilere Ränder aufzuweisen als die weiter innen gelegenen Grabenstrukturen. Die Lage der beiden Grabenränder (*At*) ist in Abb. 8.38 durch Punktsignatur (großer Punktabstand) wiedergegeben. Weiter außerhalb treten in den umgebenden Kraterebenen vereinzelt noch Bogensegmente weiterer, aber etwas schmalere Grabenstrukturen in Erscheinung (schwarze Punktsignatur in Bild 8.33)

Einige der Kuppen und Kegel auf dem Grabenboden (*Agf*) und in den Kraterebenen gehören zu Kraterruinen, teilweise mit Durchmessern bis zu 50 km (**cr**, Abb. 8.38). Annähernd linear angeordnete Kuppen sind vermutlich Reste grabenrand-paralleler Rücken (Punktsignatur in Bild 8.38, kleiner Punktabstand). Das Gelände zwischen den Kratern, die dunklen *intercrater plains*, weist stellenweise Kegel und Massive wie das Innere des Asgard-Beckens auf, allerdings in deutlich niedrigerer Zahl und mit größeren Abständen voneinander. Neben den Kratern unterschiedlichen Erhaltungszustandes sind in dieser Einheit *pAcp* auch hellere, nahezu kreisrunde Flecken aufzufinden, allerdings nur in den niedriger aufgelösten C3-Daten. Hierbei handelt es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit um stark abgetragene Palimpseste (z. B. die in Bild 8.33 mit **ApAp** bezeichnete Struktur. Einige Gruppen abgetragener Krater könnten Sekundärkrater von Asgard darstellen. Sie sind in Abbildung 8.38 mit **Acs(?)** bezeichnet.

Legt man den von *Iaquinta-Ridolfi und Schenk* (1995) mit 625 km angegebenen Durchmesser als den nominellen Kraterdurchmesser zugrunde, also als die Umgrenzung des Bereichs, aus dem Material aus der Tiefe herausgeschleudert und an der Oberfläche abgelagert wurde, so müssten sich die kontinuierlichen Ejekta etwa um einen bis eineinhalb Krateradien vom nominellen Kratertrand nach außen erstrecken. Diese äußere Grenze der kontinuierlichen Ejekta liegt ziemlich genau entlang der in Bild 8.33 gestrichelt eingezeichneten Linie, wo die Kraterhäufigkeit beim Übergang in die umgebenden Kraterebenen deutlich ansteigt. Die Einheit *Akmp* würde somit die kontinuierlichen Ejekta umfassen.

8.5.3. Beginn und Dauer der Asgardischen Periode

Das Alter des Asgard-Beckens konnte erstmals genau auf den während des Orbits C3 aufgenommenen Bilddaten bestimmt werden⁶⁶. Das Ergebnis zeigt Bild 8.39 (a) in kumulativer Darstellung. Die Kurve gibt den Fit durch die auf den Einheiten *Agf* und *Acb* (etwa im 200 - 300 km großen Beckenzentrum) gemessenen Kratergrößen an. Die kumulativen Häufigkeiten betragen $2.29 \pm 0.54 \cdot 10^{-2}$ (für $N_{cum}(D \geq 1 \text{ km})$) bzw. $3.30 \pm 0.78 \cdot 10^{-4}$ (für $N_{cum}(D \geq 10 \text{ km})$). Daraus folgt in *Model I* für den **Asgard-Event** ein Modellalter von $4.19 \pm 0.05 \text{ Ga}$. Die Umrechnung dieser Häufigkeiten in *Model IIa* ergibt ein Modellalter von 4.25 Ga (oberer/unterer Fehler: 4.56 Ga, 1.9 Ga). Beide Modellalter liegen deutlich über den von *Passey und Shoemaker* (1982) angegebenen 4.04 Ga für Asgard. Der für Asgard resultierende Alterswert in *Model IIb* ist mit 4.56 Ga (4.56 Ga, 4.17 Ga) viel zu hoch.

Die Asgardische Periode begann mit dem Einschlag eines mehrere Zehnerkilometer großen Asteroiden oder Kuiper-Belt-Objekts. Das Modell-I-Alter von 4.19 Ga ist in etwa dem Alter des

⁶⁶Die niedriger aufgelösten Voyager-Daten des Asgard-Beckens ergaben keine verlässlichen Messungen.

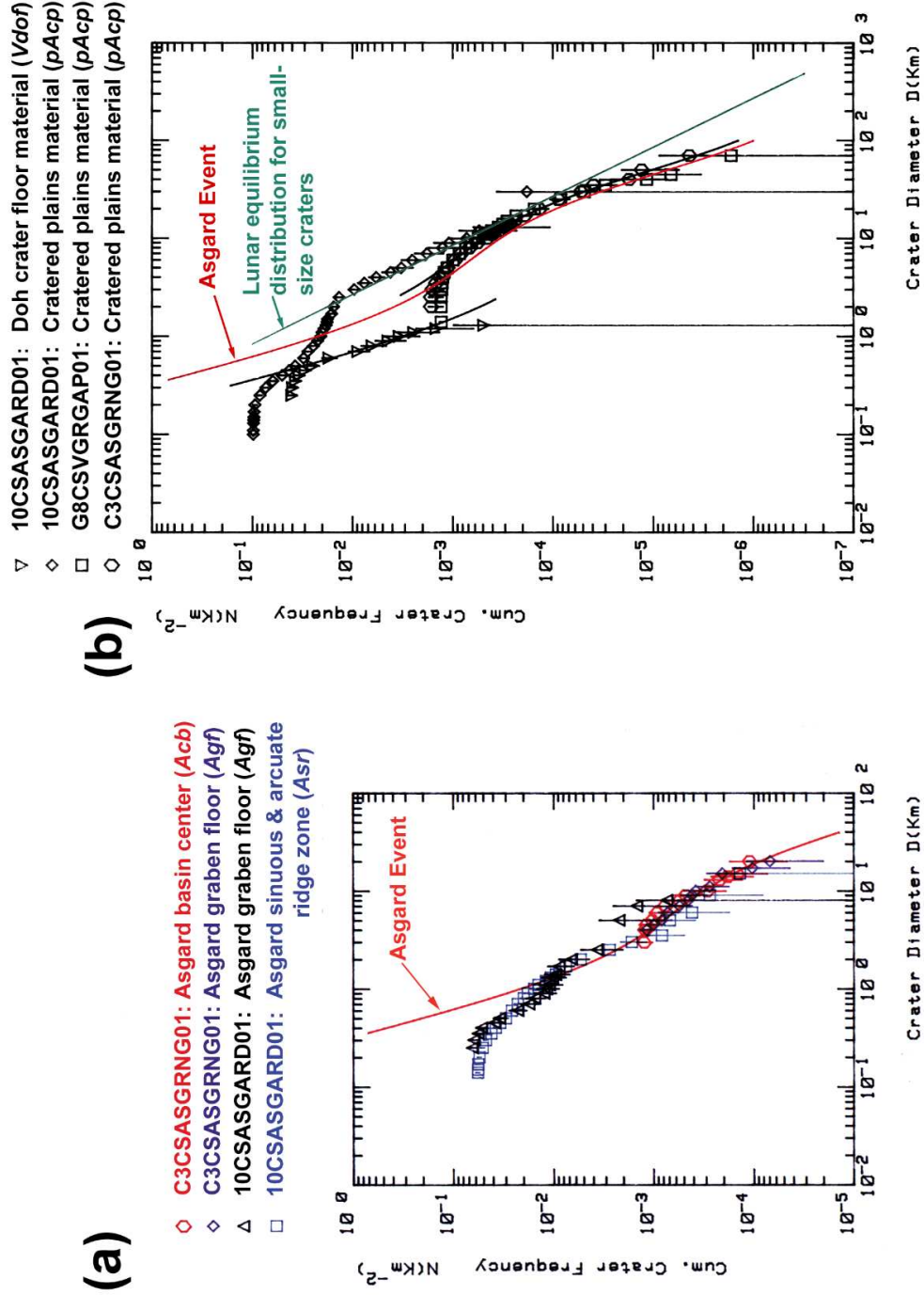


Abbildung 8.39: Kumulative Kraterhäufigkeiten geologischer Einheiten im Asgard-Becken. Zielgebiete C3CSASGRNG01 (1.1 km/pxl) und 10CSASGARD01 (88 m/pxl). (a) Messungen im Beckenzentrum (Acb), auf den Grabenböden (Agf), und im Material der *sinuous and arcuate ridge zone* (Asr); (b) Messungen der Asgard umgebenden Kraterbenen (pAcp), verglichen mit dem Doh-Kraterboden (Vdof).

Nectaris-Beckens am Beginn der Nectarischen Periode auf dem Erdmond vergleichbar (4.2 Ga: *Neukum*, 1983; 4.1 Ga: *Wilhelms*, 1987).

Ähnliche Modellalter ergaben Messungen in den Einheiten *Agf* und *Asr* auf den höher aufgelösten Daten des Orbits C10 (Abb. 8.39 (a)). Die Messpunkte im Durchmesserbereich zwischen etwa 2 km und 20 km sind stärker gestreut, passen aber immer noch gut zu denen der C3-Daten (*Agf* und *Acb*). Die Messungen auf den Grabenböden in den C10-Daten liefern meist höhere Alterswerte. Grund hierfür dürften die oft vergleichsweise kleinen Messflächen sein. Unterhalb eines Durchmessers von 1 - 2 km wird die Kurve als Folge der auch an anderen Stellen zu beobachtenden Erosionswirkung flacher.

Das kumulative Diagramm in Bild 8.39 (b) zeigt die Messung der Asgard umgebenden Krateren auf den Bilddaten von C3 und C10, verglichen mit Krateren aus einem anderen Gebiet (Zielgebiet G8CSVGRGAP01) und mit einer Messung des Kraterbodens von Doh (Einheit *Vdof*). Die in den Krateren gemessenen höheren Häufigkeiten gegenüber dem Asgard-Event (ca. ein Faktor 2 Unterschied) geben das prä-Asgardische Alter der Ebenen wieder. Der Altersunterschied beträgt in *Model I* etwa 100 Ma.

Die Messung der Krateren in den C10-Daten stimmt sehr genau mit der Messung auf den niedriger aufgelösten C3-Daten überein. Unterhalb eines Durchmessers von etwa 10 - 15 km liegt jedoch eine Gleichgewichtsverteilung vor. Zur Verdeutlichung ist die (lunare) Gleichgewichtsverteilung eingezeichnet (vergl. Gl. 7.25, Abschnitt 7.4.3; *Neukum und Dietzel*, 1971). Dass die Krater schon unterhalb von 10 km Durchmesser im Gleichgewicht sind, könnte darin begründet sein, dass der kurze Abschnitt der C10-Traversal, der die Krateren abdeckte, gerade in einem Gebiet mit einer besonders hohen lokalen Konzentration an Kratern und Kraterresten liegt. Ein weiterer Grund für die hohe gemessene Kraterdichte könnte zusätzlich das Mitmessen von möglichen Sekundärkratern Asgards sein. Sekundärkrater von Becken sind meist mehrere Kilometer bis etwa 20 km groß. Hier sind sie, falls vorhanden, wohl ähnlich stark abgetragen wie die Grabenränder von Asgard und daher nicht zweifelsfrei als Sekundärkrater zu identifizieren. Beispiele möglicher Gruppen von Asgard-Sekundärkratern sind in Bild 8.38 mit **Acs(?)** gekennzeichnet.

Unterhalb eines Durchmessers von etwa 2.5 km wird die Verteilung fast schlagartig flacher. Hier kommen, wie an anderer Stelle beobachtet, Erosionsprozesse zum Tragen, die die kleinen Krater schneller auslöschen, als sie sich akkumulieren konnten. Die Krater über 2.5 km Größe wurden dagegen nicht vollständig erodiert, blieben teilweise als Ruinen übrig, die -2-Verteilung ist daher bis ≈ 15 km Durchmesser (darüber wieder Produktionsverteilung) noch erhalten.

Die im jüngeren Dom-Krater auf allen Einheiten nachzuweisende steile Produktionsverteilung steht im Gegensatz zur flachen Verteilung in den älteren Krateren im gleichen Durchmesserbereich, wie die Diagramme der Abb. 8.39 (b) und 8.40 verdeutlichen. Der Schluss liegt nahe, dass Erosionsprozesse vor allem in den geologisch älteren Gebieten durch das heftige Bombardement auch von Klein- und Mikrometeoriten "getriggert" wurden und jüngere geologische Einheiten, die wie Doh gegen Ende oder nach diesem heftigen Bombardement entstanden, nicht mehr so stark verändert wurden.

Beispiele kumulativer Verteilungen auf einzelnen Einheiten der Doh-Formation (*Vdod*, *Vdop*, *Vdof* und *Vdoc*) sind in Abb. 8.40 dargestellt. Da die Verteilungen innerhalb der Fehler über-

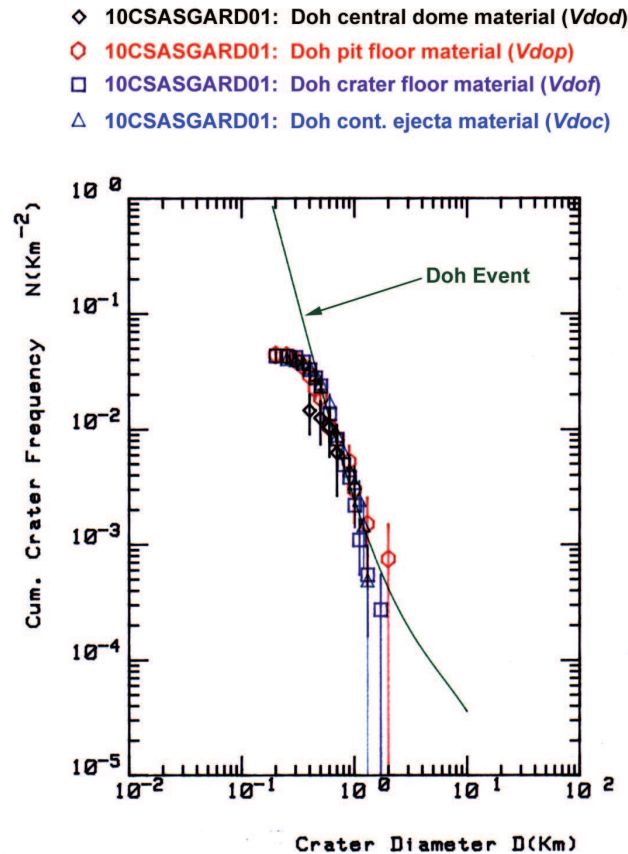


Abbildung 8.40.: Messungen in geologischen Einheiten des Dom-Kraters Doh. Folgende Schichtglieder der Doh-Formation wurden gemessen: *Vdod*, *Vdop*, *Vdof*, und *Vdoc*.

einander liegen, sind alle diese Einheiten zur gleichen Zeit entstanden. Dies stimmt überein mit Messungen auf anderen Dom-Kratern, etwa Neith auf Ganymed (*Wagner et al.*, 1998b). Die Verteilungen behalten außerdem bis zum Erreichen der Bildauflösungsgrenze, mindestens aber bis herab zu einem Durchmesser von 500 m die steile Steigung ungestörter Produktionsverteilungen bei. Erosions- und Abtragungsprozesse haben die Krater im hier gemessenen Durchmesserbereich zumindest nicht beeinflusst.

Das Modellalter des Dom-Kraters Doh beträgt in *Model I* 3.86 ± 0.03 Ga. Damit entstand der Krater innerhalb des Fehlers gleichzeitig mit Lofn zu Beginn der jüngeren Epoche der Valhallischen Periode. Nach *Model IIa* entstand Doh vor **1.18 Ga** (oberer/unterer Fehler: 3.54 Ga, 265 Ma) alt. Die entsprechenden Alterswerte in *Modell IIb* sind *2.56 Ga* (4.18 Ga; 1.1 Ga).

8.5.4. Zielgebiet 30CSHIRES_02: Graben und Kraterebenen des Asgard-Beckens in sehr hoher Auflösung

Während der dreißigsten Umrundung Galileos um Jupiter nahm die SSI-Kamera die am höchsten aufgelösten Bilddaten von Callisto auf. Diese vier Bildsequenzen (30CSHIRES_01 bis 30CSHI-

CALLISTO: SSI target area 30CSHIREs_02 (10 m/pxl)

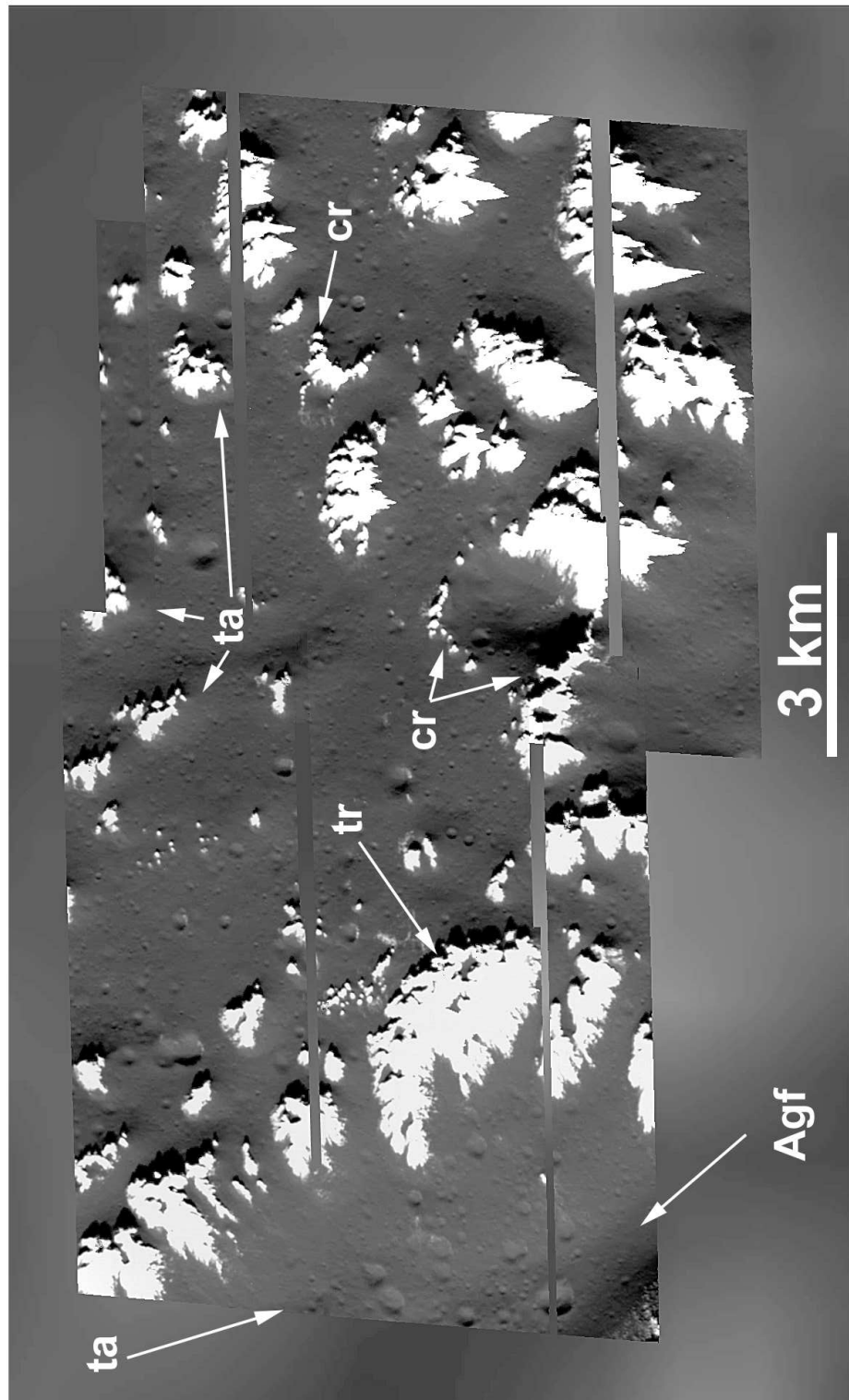


Abbildung 8.41.: Mosaik der hoch aufgelösten (10 m/pxl) Sequenz 30CSHIREs_02 im C3-Kontext (1.1 km/pxl). SSI-Bildnummern 30C0005, 30C0006 und 30C0007. Das Mosaik ist nur sehr ungenau im niedriger aufgelösten Kontext zu lokalisieren. Zur Erläuterung der Symbole siehe Text.

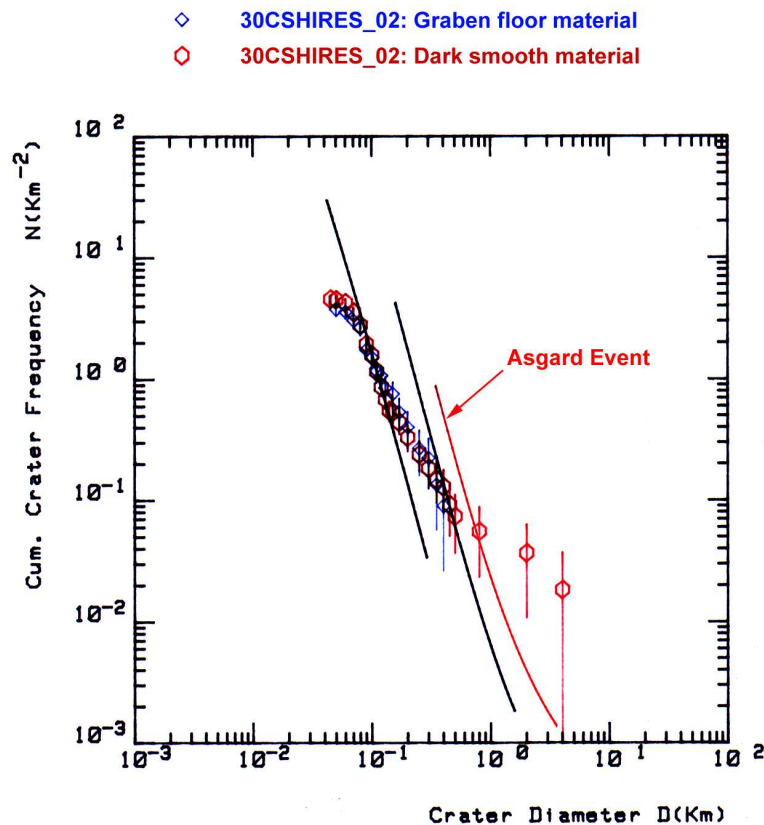


Abbildung 8.42.: Kumulative Häufigkeiten der hoch aufgelösten Sequenz 30CSHIRES_02.

RES.04) mit Auflösungen zwischen 4 m/pxl und 10 m/pxl liegen alle in der Nähe des Asgard-Beckens. Mit Ausnahme der Sequenz 30CSHIRES_02 ist so gut wie kein Kontext vorhanden.

Die drei SSI-Bilder der Sequenz 30CSHIRES_02 mit 10 m/pxl "landeten" etwa 20 bis 30 km östlich der C10-Traversal im Zielgebiet C3CSASGARD01 (1.1 km/pxl) am Rand eines der Asgard-Gräben. Die Lage dieser Sequenz ist in Bild 8.33 angegeben. Bild 8.41, das Mosaik dieser Aufnahmesequenz, verdeutlicht den hohen Auflösungsunterschied zwischen den C30- und den C3-Daten, der mehr als einen Faktor 100 beträgt. Die Qualität der drei Bilder ist durch die bereits aus anderen Zielgebieten bekannten *icycles* (Überbelichtung der hellen, topographisch hoch gelegenen Gebiete) beeinträchtigt

Der Grabenrand, dessen nördlicher Rand in der Sequenz erfasst ist (**tr**, Abb. 8.41), ist hier weniger als 10 km breit (ermittelt aus den C3-Daten). Der Grabenrand ist an mehreren Stellen bedingt durch Erosionsprozesse durchbrochen. Die Tiefe des Grabens ist nicht zu bestimmen, da keine messbaren Schatten auftreten.

Einige der hellen Kuppen und Massive (Reste abgetragener Krater (**cr**)) und der Grabenrand sind von einem Schuttfächer (Talus, **ta** in Abb. 8.41) umgeben, die in der gegebenen Bildauflösung frei von kleinen Kratern sind. Der nach Ansicht von *Moore et al.* (1999) durch Subli-

mationsverwitterung in den topographisch höher gelegenen, hellen Massiven entstehende dunkle Rückstand rutscht langsam talwärts und löscht dabei die kleinen Krater aus.

Die kumulative Verteilung der in den Bilddaten dieser Sequenz gemessenen Krater stellt Bild 8.42 dar. Lediglich zwei Einheiten wurden unterschieden: die Ebenen außerhalb des Grabens (*dark smooth material*), und das Innere des Grabens (*graben floor material*). Beide Einheiten unterscheiden sich in der Form der Verteilung und in der Häufigkeit praktisch nicht. Die größten Krater sind nur noch als Ruinen vorhanden und etwa 1 bis 4 km groß. Die Verteilung dieser Krater verläuft sehr flach, ähnlich der der Einheit *pAcp* außerhalb des Asgard-Beckens (vergl. Bild 8.39 (b))

Im Durchmesserbereich unterhalb 1 km wird die Verteilung beider Einheiten durch Erosionswirkung flacher. Allerdings lassen sich etwa zwischen 300 und 600 m und zwischen 150 m und 70 - 80 m in steilen Abschnitten Alter bestimmen. Hier deutet sich an, dass bei Bildauflösungen unter 20 - 30 m/pxl steile Verteilungen bei den kleinen Kratern unter 200 - 300 m, die einer ungestörten Produktionsverteilung entsprechen, der Regelfall sind. Dies folgt auch aus der Analyse weiterer Gebiet in dieser Bildauflösung (vergl. Abschnitt 8.6.9.1).

Die Modellalter dieser beiden Einheiten liegen deutlich unter dem Alter des Asgard-Beckens, wie Bild 8.42 zeigt. Der Wechsel flacherer und steilerer Abschnitte in den Verteilungen lässt den Schluss auf unterschiedliche Erosionsphasen zu. Erosion und Abtragung sind mit der Zeit unterschiedlich schnell verlaufen, möglicherweise aufgrund von Schichtung der Kruste in unterschiedlich schnell verwitternde Substanzen, wie an anderer Stelle bereits ausgeführt (vergl. Abschnitt 8.4.6). Daraus resultiert einmal ein etwas höheres Alter von 3.97 Ga in *Model I* durch den Fit im Durchmesserbereich 300 bis 600 Meter, das aber nicht genau festgelegt ist, da die Verteilung nicht eindeutig steil verläuft. Sicherer ist das jüngere Alter durch die steile Verteilung bei Durchmessern unter 150 Metern. *Model I* ergibt hier ein Alter von 3.5 Ga⁶⁷.

8.5.5. Mögliche Spuren von Kryovulkanismus auf Callisto

Spuren vergangener kryovulkanischer Aktivität auf Callisto glaubte man vereinzelt in den Voyager-Daten zu erkennen (*Stooke*, 1989; *Wagner et al.*, 1989). Mögliche Typlokalitäten waren bei Voyager-Auflösung glatte, sowohl helle als auch dunkle Gebiete. Lediglich auf zwei solcher Gebiete konnte die SSI-Kamera ausgerichtet werden, eines mit vorwiegend hoher (Orbit C10) und eines mit niedriger Albedo (Orbit C20).

8.5.5.1. Helle, glatte Gebiete

Südlich des Kraters Gloi, etwa bei 32° N, 248° W, zeigen die Voyager-2-Daten bei einer Auflösung von etwa 2 km/pxl ein auffallend glattes, in der Albedo den Kraterebenen ähnliches Gebiet mit einer Reihe großer Krater, aber wenig kleineren Kratern unter 30 - 40 km Durchmesser.

⁶⁷Für die beiden Modelle *I Ia/I Ib* ergeben sich Alter von 2.06 Ga (4.3 Ga, 518 Ma) bzw. von 3.69 Ga (4.53/1.94 Ga) für den älteren Fit, und von 251 Ma (1.12 Ga, 51. Ma) bzw. 658 Ma (1.7 Ga, 231 Ma) für den jüngeren.

Eine Überprägung, möglicherweise durch Extrusion kryovulkanischer "Lava", wurde vermutet (Stooke, 1989; Wagner *et al.*, 1989; Wagner und Neukum, 1994b). Eine nähere Untersuchung durch höher aufgelöste SSI-Daten konnte nicht durchgeführt werden, da dieses Gebiet nie von der Galileo-Sonde in ausreichend niedriger Höhe überflogen wurde.

Das Gebiet und die darin gemessenen kumulativen Häufigkeiten sind in Bild 8.43 dargestellt. Es repräsentiert die Typlokalität einer in regionalem Maßstab als **smooth, sparsely cratered material - Asc** kartierten Einheit. Die westliche und südliche Grenze zu den Kraterebenen ist scharf durch den deutlichen Wechsel in der Kraterhäufigkeit (Punktsignatur in Abb. 8.43). Nach Norden und Osten ist der Übergang eher graduell. Einzelne Gruppen von Kratern mit Durchmessern um 10 bis 20 km könnten der bereits an anderer Stelle (Abschnitt 8.4.4) diskutierten Einheit *V Aca* angehören (**V Aca**, Abb. 8.43).

Bemerkenswert in diesem Gebiet ist neben der geringeren Häufigkeit kleinerer Krater unter 20 km Durchmesser eine Reihe großer Krater (> 40 km Durchmesser), die weitgehend überdeckt sind (Pfeile in Abb. 8.43). Vergleiche mit lava-gefüllten Kratern in den lunaren Maregebieten suggerieren eine Überprägung durch kryovulkanische Prozesse (vergl. *Wilhelms*, 1987; *Stooke*, 1989; *Wagner et al.*, 1989; *Wagner und Neukum*, 1994b). Eindeutige Indizien für Vulkanismus fehlen: Weder sind Fließfronten vorhanden noch sind Kalderen oder Förderspalten zu identifizieren. Ein etwa 20 - 30 km breites und etwa 100 km langes, annähernd linear verlaufende Band, das sich nach Norden zu gabelt, könnte eine Förderspalte darstellen (**v??** in Abb. 8.43). Da Lavaströme oder Halos um die "Spalte" fehlen, ist dies aber eher unwahrscheinlich.

Vereinzelt sind bei regionaler Bildauflösung weitere Gebiete zu identifizieren, die der Einheit *Asc* ähnlich sind. Meist handelt es sich um kleinere Areale, die wegen der geringeren Auflösung nicht zu detaillierten Kraterhäufigkeitsmessungen geeignet sind. Sie wurden vorläufig in der Einheit *Asc* zusammengefasst (vergl. geologische Karten, Abb. 9.3 ff., Abschnitte 9.3.2 ff.).

Die Zuordnung zum Asgardischen System beruht auf der in Bild 8.43 gezeigten kumulativen Häufigkeit. Der Überprägungs-Event hat demzufolge nach der Entstehung des Asgard-Beckens stattgefunden: Das *Model-I*-Alter liegt bei 4.15 Ga, während die großen, nicht vollständig überdeckten Krater überwiegend dem älteren, prä-Asgardischen System (*Model-I*-Alter: 4.3 Ga) angehören.

Ein von *Bender et al.* (1997b) als *smooth plains* kartiertes Gebiet wurde in hoher Auflösung von der SSI-Kamera während des Orbits C10 abgedeckt. Nähere Untersuchungen bestätigten eine Entstehung durch Kryovulkanismus nicht. Dieses Gebiet ist aus anderen Gründen von Bedeutung, wie in Abschnitt 8.6.11 näher erläutert werden wird.

8.5.5.2. Dunkle, glatte Gebiete

Dunkle, bei Voyager-Auflösung glatte Regionen sind in den Kraterebenen verbreitet, erstrecken sich aber nur über einige Zehnerkilometer. Obwohl die unzureichende Auflösung der Voyager-Daten eine detaillierte Untersuchung nicht zulässt, scheint das dunkle Material topographisch

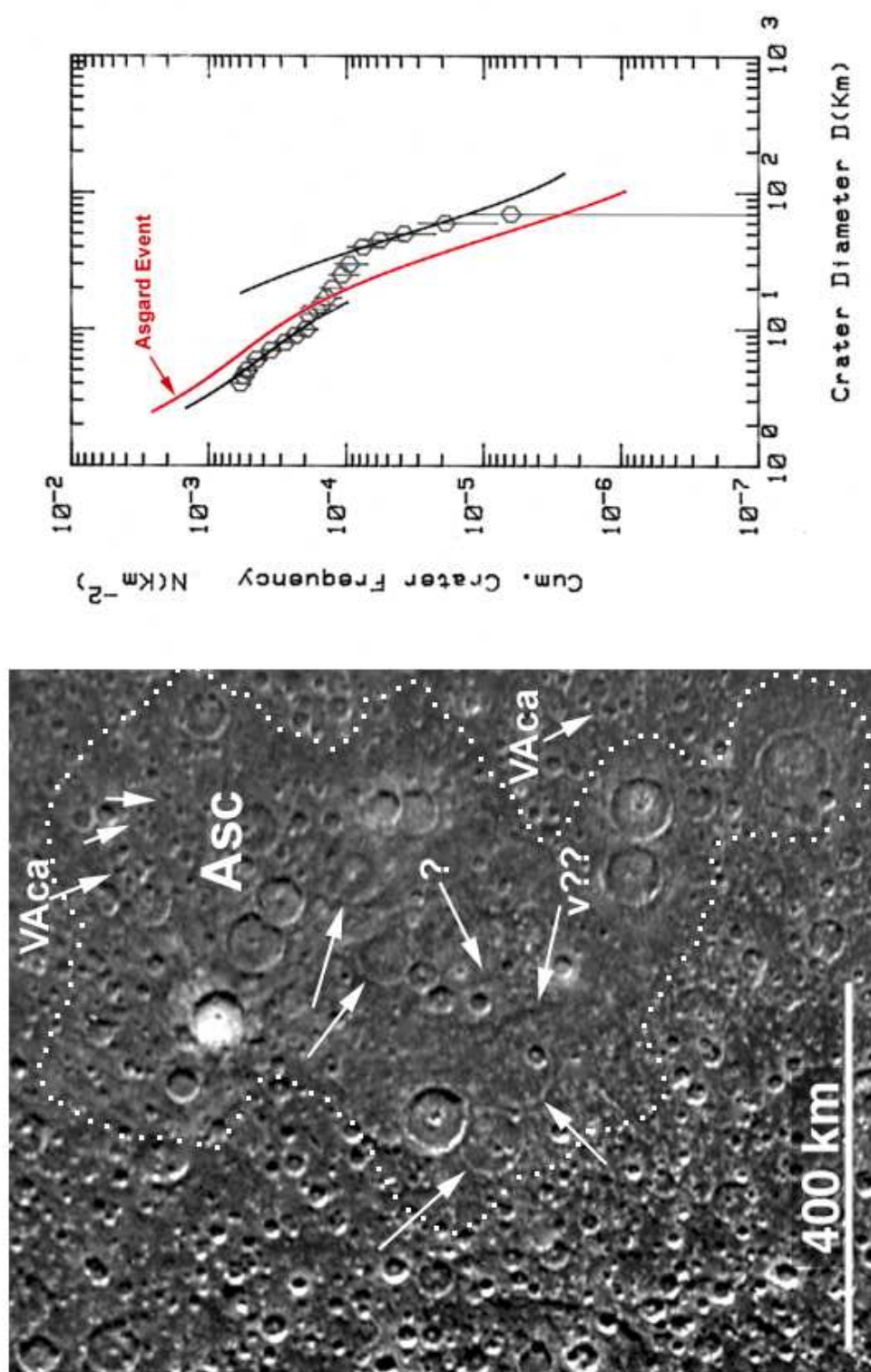


Abbildung 8.43.: Einheit *smooth, sparsely cratered material* (Asc) nahe des Kraters Gloi und ihre kumulativen Häufigkeiten.

höheres Terrain wie Kraterränder erkennbar zu umfließen (*embayment*). *Schenk* (1995) interpretierte diese dunklen Flecken (*dark patches*) als Anzeichen vulkanischer Aktivität, bei der dunkles Material in vergleichsweise geringen Mengen gegen Ende der Kraterebenenentstehung gefördert wurde (so genannte *low-volume late-stage extrusions of "dark" material*, ebd.). In regionaler Bildauflösung lassen sie sich bereits in den Voyager-Daten teilweise gut abgrenzen und sind hier als Einheit **dark, smooth material - Ads** kartiert.

Für den vierten gezielten Galileo-Vorbeiflug an Callisto (Orbit C20) plante das SSI-Team eine Bildsequenz, die neben den Kraterebenen einen dieser dunklen Flecken in regionaler Bildauflösung mit 430 m/pxl abdeckte (Zielgebiete 20CSCRSTAT_03 und 20CSDRKFLO02). Eine einzelne Aufnahme erfasste diese so genannten *dark "flows"* noch einmal in höherer Auflösung (Zielgebiet 20CSDRKFLO01, 108 m/pxl).

Bild 8.44 zeigt einen Ausschnitt des aus den Daten der Zielgebiete 20CSCRSTAT_03 und 20CSDRKFLO02 zusammengesetzten Mosaiks im Kontext der Voyager-Daten. Das Gebiet mit den *dark flows* liegt etwa bei 4° südlicher Breite und 190° westlicher Länge. Auf den Voyager-Daten mit einer Auflösung von lediglich 2.5 - 3 km/pxl (oben in Abb. 8.44) ist neben den dunklen Flecken (schwarzer Pfeil) ein helles Gebiet mit polygonalem Umriss zu sehen. Der östliche Rand des hellen Gebiets ist durch ein dunkles Lineament markiert (kleine weiße Pfeile im eingesetzten Bild; im SSI-Mosaik, dort schlechter erkennbar, mit **L** gekennzeichnet).

Helle Gebiete mit polygonalem (bzw. in der Terminologie von *Schenk* (1995) amöben-förmigen) Umriss sind in den Kraterebenen weit verbreitet. Mit hoher Wahrscheinlichkeit handelt es sich um abgetragene Palimpseste oder Gruppen von zwei oder drei Palimpsesten, die ursprünglich nicht als solche erkannt wurden.

Für das in Bild 8.44 gezeigte Gebiet bestätigt sich diese Interpretation. Zwei bis drei konzentrisch angeordnete Segmente von Bergrücken sind ein eindeutiger Hinweis auf eine Impaktstruktur (weiße Pfeile). Der Durchmesser dieses Palimpsests (**Ap** in Abb. 8.44) beträgt mindestens 100 bis 150 km. Eine etwa 80 km lange, aus stark abgetragenen Einzelkratern bestehende Kraterkette zeigt annähernd auf das Zentrum des Palimpsests und entstand vermutlich durch Ejektamaterial (**ca** in Bild 8.44). Die Oberfläche des Palimpsests ist charakterisiert durch helle Massive, die dem Gebiet eine rauhe, hügelige Oberfläche verleihen. Die Struktur weist bereits erhebliche Abtragungerscheinungen auf, eine genaue Grenze der kontinuierlichen Ejekta etwa wie bei der in Bild 8.21 (Einheit *VAp*) gezeigten Struktur ist hier nicht mehr festzulegen. Das durch eine Vielzahl heller Hügel charakterisierte Gelände setzt sich weiter nach Osten fort. Möglicherweise befindet sich hier ein weiteres, älteres und noch stärker abgetragenes Palimpsest (**pAp** in Abb. 8.44). Die SSI-Daten geben keinen schlüssigen Hinweis auf mehr als ein Palimpsest, während man aus den Voyager-Daten auf zwei unmittelbar nebeneinander liegende Palimpseste schließen könnte.

Die in der Abb. eingezeichneten und mit **L** markierten Lineamente repräsentieren ein altes Bruchsystem. In einem späteren Abschnitt werden Lineament- und Bruchstrukturen und ihre Richtungsverteilungen, auch aus dem hier beschriebenen Gebiet, näher analysiert (Abschnitt 8.6.11).

Der in den Voyager-Daten so auffällige dunkle Fleck ist in den SSI-Daten weit weniger mar-

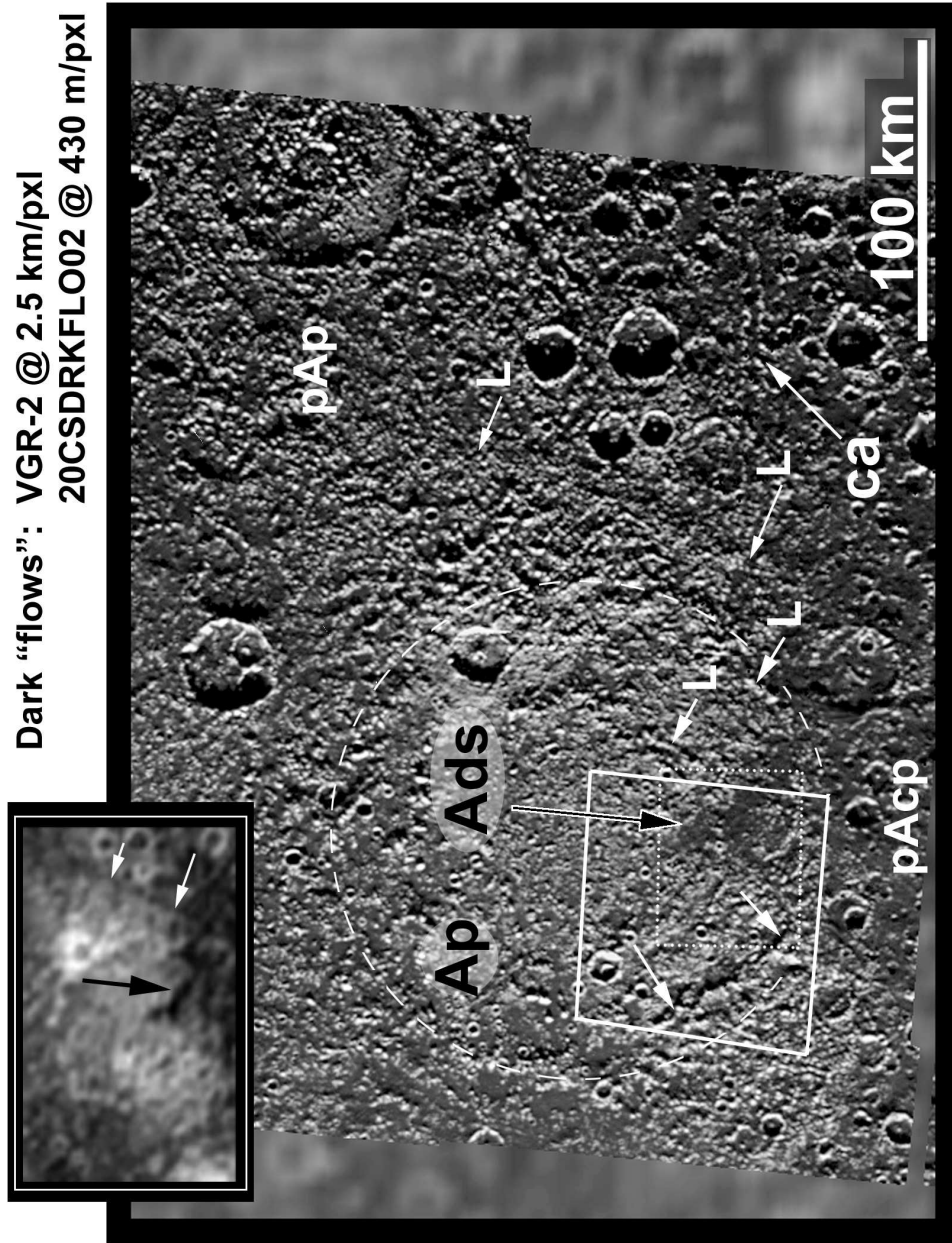


Abbildung 8.44.: *Dark "flows"*: Detailaufnahme des SSI-Zielgebiets 20CSDRKFLO02. Bildauflösung 430 m/pxl, Voyager-Kontext im Hintergrund ca. 2.5 km/pxl. Das oben eingesetzte Bild zeigt das Gebiet in den Voyager-2-Daten; Umriss des Zielgebiets 20CSDRKFLO01 (108 m/pxl) im Kontext von 20CSDRKFLO02 eingezeichnet; SSI-Bildnummern 20C0012 und 20C0013. Punktssignatur: Umriss der Detailansicht von Abb. 8.45 (links). Pfeile schwarz: *dark "flows"*, Einheit **Ads**; **Ap** und **pAp**: abgetragene Palimpseste (Haupttrung von *Ap* weiß gestrichelt); Kratererebenen (**pAcp**); Pfeile weiß: konzentrische Strukturen (Bergrücken) des westlicheren der beiden Palimpsests *Ap*.

kant und geht mehr oder weniger in das dunkle Material der südlich anschließenden dunklen Kraterebenen über. Ein Ausschnitt des SSI-Einzelbildes des Zielgebiets 20CSDRKFL001 mit 108 m/pxl Auflösung im Kontext der 20CSCRSTAT_03- und 20CSDRKFL002-Daten ist in Bild 8.45 (links) dargestellt. Das dunkle Material **Ads** erscheint bei dieser Auflösung nicht länger als glatt oder eben, sondern wellig bis hügelig. Die hellen, aus dem dunklen Material herausragenden Massive sind entweder kegelförmig oder länglich. Auffallend ist die vorzugsweise Anordnung ihrer Längsachsen in NW-SE bzw. NE-SW, etwas maskiert durch die hier zufällig ebenfalls NW-SE-verlaufenden konzentrischen Ringbögen der Palimpseststruktur (vergl. Abschnitt 8.6.11). Aus Messungen von Schattenlängen bei einem durchschnittlichen solaren Einfallswinkel von 75 – 80° konnten Höhenunterschiede der hellen Massive in der Größenordnung von mehreren hundert bis fast tausend Metern (Ringbögen des Palimpsests) ermittelt werden.

Die Abmessungen der einzelnen Hügel innerhalb des dunklen Flecks betragen wenige Kilometer. An einigen Stellen ragen noch einzelne, kleinere helle Massive heraus. Die Genese dieser Hügel aus der Verwitterung und Erosion des ehemals topographisch höher gelegenen anstehenden Eis-”Fels”-Gemischs ist offensichtlich: Durch Sublimationsverwitterung (vergl. *Moore et al.*, 1999) verdampfen die leichtflüchtigen Bestandteile, das helle Gebiet wird abgetragen, der dunkle Rückstand sammelt sich um die Massive. Nach einiger Zeit sind die hellen Massive verschwunden, übrig bleiben die dunklen, mehrere Kilometer langen und breiten Hügel oder Kuppen. Der vermutlich sehr feinkörnige dunkle Rückstand wird weiter transportiert und sammelt sich in Senken, entweder durch Hangabtragung, oder aber auch durch einen ”exotischen” Prozess wie elektrostatische Levitation (*Klemaszewski et al.*, 1998b; *Moore et al.*, 1999, 2004).

Die stratigraphischen Beziehungen zwischen den einzelnen Einheiten dieses Gebiets gehen zusätzlich aus dem kumulativen Kraterhäufigkeitsdiagramm in Abb. 8.45 (rechts) hervor. Die Kraterebenen (*cratered plains*; **pAcp** in Abb. 8.44) sind prä-Asgardisch. Die Modellalter liegen in (*Model I* bei 4.23 ± 0.05 Ga. Das Palimpsest konnte anhand der Zählung in das Asgardische System (Einheit **Ap**) gestellt werden. Die Modellalter liegen hier bei 4.17 ± 0.06 Ga (*Model I*). Die Alter des mutmaßlichen älteren, östlich angrenzenden Palimpsests (**pAp**; im kumulativen Diagramm nicht enthalten) deuten eher auf ein prä-Asgardisches Alter.

In den so genannten *dark flows* der Einheit **Ads** (in Bild 8.45 mit *dark smooth material* bezeichnet) wurde ein dem Palimpsest *Ap* vergleichbares Asgardisches Alter gemessen. In allen Einheiten nimmt die Steigung der Verteilung unterhalb eines Durchmessers von ungefähr 1 bis 1.5 km gegenüber der Produktionverteilung ab. Erosions- und Abtragungsprozesse kleinerer Krater finden hier ihren Niederschlag.

Das Fehlen von Fließfronten, Kalderen oder Förderspalten zeigt, dass eine Entstehung des dunklen Materials durch kryovulkanische Prozesse sehr unwahrscheinlich ist (*Wagner et al.*, 2000; *Greeley et al.*, 2000b; *Moore et al.*, 2004). Darauf deutet auch die deutlich hügelige Oberfläche im Zielgebiet 20CSDRKFL001 hin. Ferner ist in den SSI-Daten keine deutliche Grenze zwischen dem Material des dunklen Flecks und der südlich anschließenden Kraterebenen erkennbar. Anstelle einer kryovulkanischen Entstehung des dunklen Material deutet alles vorzugsweise auf die Wirkung von Erosion, Abtragung und der Anreicherung eines dunklen Verwitterungsschutts hin. Die Anreicherung dunklen Materials, die bei niedrigerer Auflösung den Eindruck eines dunklen Flecks hervorruft, könnte folgende Ursachen gehabt haben: (1) Das helle, höher

Target area 20CSDRKFLO01 (108 m/pxl)

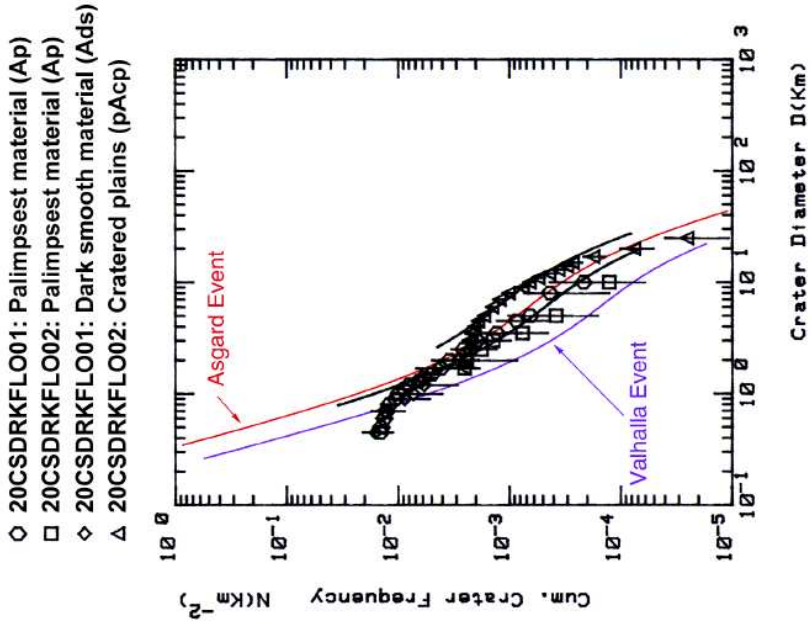
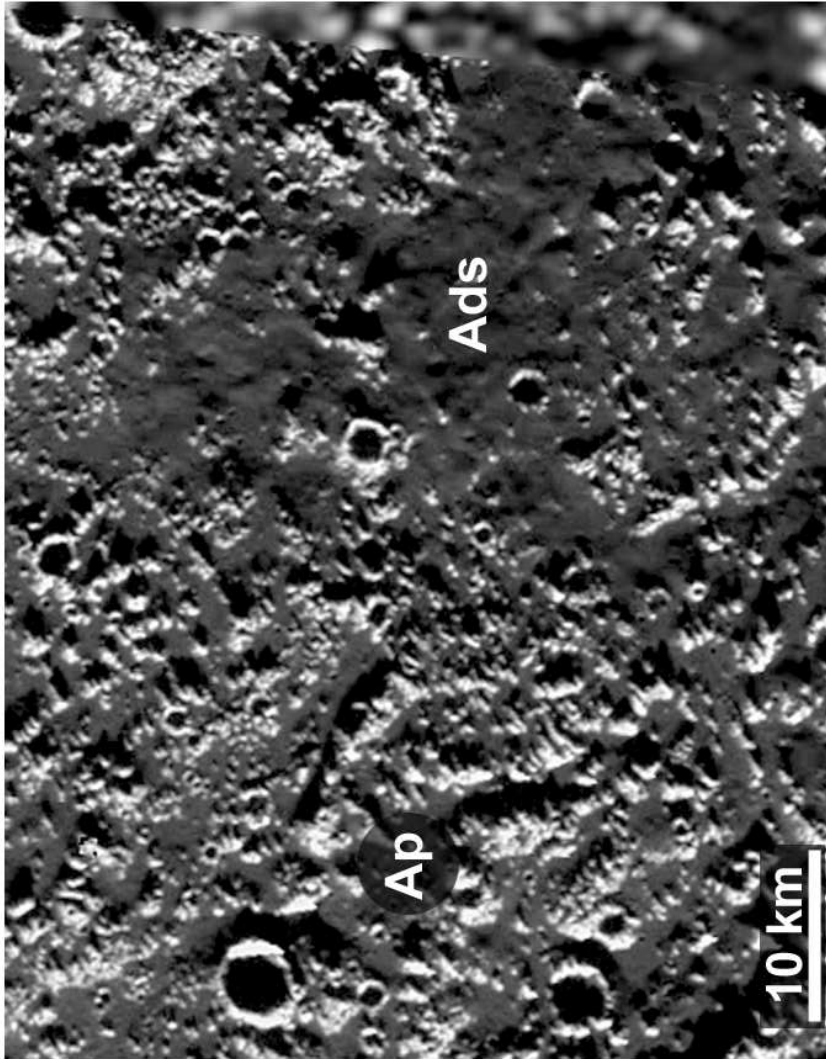


Abbildung 8.45.: Detailansicht des Zielgebiets 20CSDRKFLO01 (links) und kumulative Kraterhäufigkeiten (rechts) der Zielgebiete 20CSDRKFLO01 und 20CSDRKFLO02. Bildauflösungen: 108 m/pxl (20CSDRKFLO01), 430 m/pxl (20CSDRKFLO02); SSI-Bildnummer: 20C0002. Weitere Erläuterungen im Text.

gelegene Ausgangsmaterial könnte an dieser Stelle verglichen mit dem umgebenden Palimpsestmaterial bereits auf einem insgesamt niedrigeren Level gelegen haben, so dass es bei annähernd gleichen Erosionsraten schneller eingeebnet war. (2) Materialunterschiede innerhalb des Ausgangsmaterials könnten aufgrund unterschiedlicher Widerstandsgrade gegenüber Erosionsprozessen zu Unterschieden in der Abtragungsrate geführt haben. (3) Eher unwahrscheinlich, aber nicht ganz auszuschließen sind vertikale tektonische Bewegungen, wodurch sich dunkles Material vorzugsweise dann über den tieferen Schollen angereichert hätte. Die Längsachse des dunklen Flecks liegt annähernd parallel zu einer tektonischen Vorzugsrichtung von etwa NW-SE, die auch in Lineamenten in den hellen Massiven des Palimpsests (bzw. an ihren Rändern) zu sehen ist. Anzeichen für etwaige Abschiebungen oder Staffelbrüche sind aber nicht erkennbar.

Obwohl eine kryovulkanische Entstehung zumindest für die hier gezeigte Einheit *Ads* mit hoher Wahrscheinlichkeit auszuschließen ist, gilt dies nicht notwendigerweise für andere Gebiete auf Callisto, in denen dunkles Material Krater der Asgardischen oder prä-Asgardischen Kraterenebenen zu umfließen scheint. In regionalen Karten (Abb. 9.3 ff., Abschnitt 9.3.2 ff.) wird daher die Aufstellung der vermutlich ins Asgardische System gehörenden Einheit **Ads** vorläufig beibehalten. Eine umfassendere Abdeckung von Callisto mit Bilddaten von wenigstens 200 m/pxl ist in jedem Fall erforderlich, um die verbleibenden mutmaßlichen *dark flows* näher zu untersuchen.

8.5.6. Geologie und Datierung der Krater Har und Tindr

Die Kraterformen auf Callisto und seinem inneren Nachbarn Ganymed geben Aufschluss über die rheologischen Eigenschaften der Krusten und die thermale Entwicklung der beiden Satelliten (vergl. Abschnitte 5.3.3, 5.4.5, und *Schenk et al.*, 2004). Leider war es aufgrund der technischen Probleme der Galileo-Sonde und der daraus resultierenden unzureichenden Abdeckung mit genügend hoch aufgelösten Bilddaten nicht gelungen, eine solide Datenbasis herzustellen, um eine zeitliche Abfolge in den Veränderungen von Kraterformen genau zu bestimmen. Dies gilt für Callisto noch mehr als für Ganymed. Neben den drei Becken Asgard, Valhalla und Lofn konnten im Verlauf der gesamten Mission nur die folgenden fünf Impaktstrukturen in einer Auflösung von weniger als 500 bis 600 m/pxl aufgenommen werden: (a) ein kleiner Teil der Kraterkette Gomul Catena (39 m/pxl; beschrieben in Abschnitt 8.4.8), (b) der Strahlenkrater Bran (610 m/pxl), (c) der Dom-Krater Doh (88 m/pxl; Beschreibung siehe weiter oben in Abschnitt 8.5.2), und (d) die beiden unmittelbar benachbarten Krater Har und Tindr.

Die beiden Krater Har und Tindr unterscheiden sich wesentlich in ihrer Morphologie. Tindr gehört den regulären Kratern an, Har ist wie Doh ein Vertreter der Dom-Krater⁶⁸. Unterschiede in ihrer Morphologie ließen sich bereits in den Voyager-Daten eindeutig identifizieren. Allerdings berücksichtigten *Bender et al.* (1997b) nur die lithostratigraphische Zuordnung zu den Einheiten c_2 (Tindr) und c_1 (Har), nicht die spezifische Morphologie.

In Bild 8.46 sind beide Krater in der höheren Auflösung der SSI-Daten im Kontext der Voyager-1-Daten abgebildet. Die beiden SSI-Zielgebiete, C9CSHAR_01 und 10CSTINDR_01 bestehen nur aus je einer Einzelaufnahme. Die Bildauflösung ist mit 390 m/pxl bei Tindr und 143 m/pxl

⁶⁸*Schenk* (1995) bezeichnete Har als *anomalous dome crater*.

Har (C9CSHAR__01)

Tindr (10CSTINDR_01)

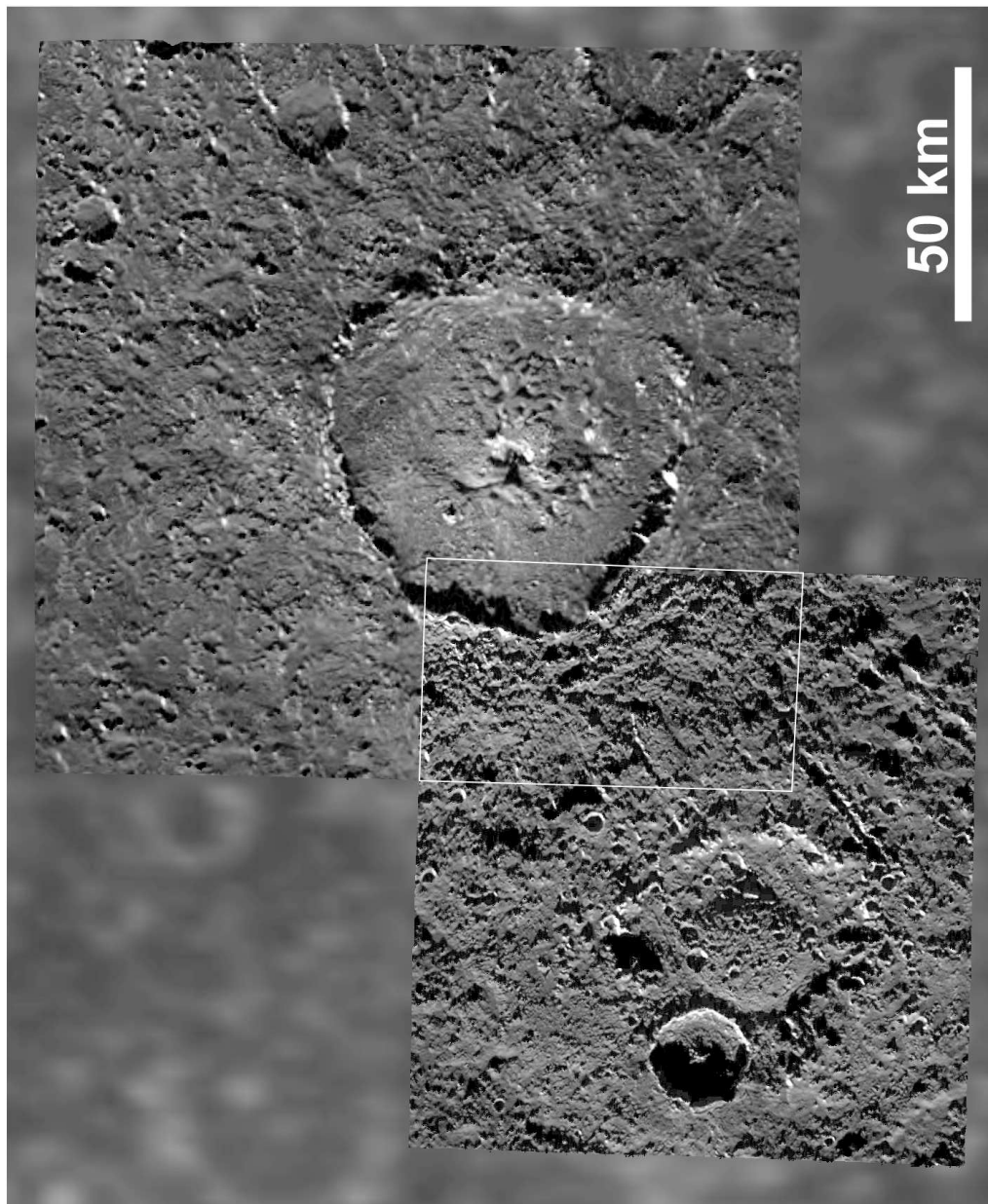


Abbildung 8.46.: Der "reguläre" Krater Tindr (rechts) und der Dom-Krater Har (links) im Voyager-Kontext. Geographische Breite und Länge des Bildzentrums 3° S, 357° W. SSI-Zielgebiete C9CSHAR__01, 143 m/pxl, SSI-Bildnummer C9C0001, und 10CSTINDR_01, 390 m/pxl, Bildnummer 10C0030. Der Umriss kennzeichnet die Lage des Anaglyphenbildes Abb. 8.74 (Abschnitt 8.6.11).

bei Har ausreichend, um einzelne Schichtglieder der beiden Kraterformationen zu unterscheiden und beide Krater mit Einschlagskraterhäufigkeiten zu datieren. Etwas erschwerend bei der Auswertung ist der niedrige Sonnenstand in beiden SSI-Aufnahmen (79° bei Tindr, 84° bei Har) mit den starken Schlagschatten. Im Überlappungsbereich beider Aufnahmen konnte ein Anaglyphenbild hergestellt werden (siehe Abb. 8.74, Abschnitt 8.6.11).

Tindr ist ein etwa 70 km großer Krater, dessen Umriss sich von Osten nach Westen verjüngt. Aus der Verjüngungsrichtung des Kraterandes von Tindr ist auf einen schiefwinkligen Einschlag unter 20° ziemlich genau von Osten zu schließen. Sowohl kontinuierliche als auch diskontinuierliche Ejekta sind zu erkennen. Beide bilden die Einheiten **Vtis - secondary crater material** und **Vtie - continuous ejecta material** der **Tindr Formation**. Ihre Verbreitung ist aus der geologischen Karte in Abb. 8.47 zu ersehen.

Obwohl fehlende Albedounterschiede zwischen den Ejekta und den umgebenden Kraterebenen die Kartierung erschweren, lässt sich die äußere Grenze der kontinuierlichen Ejekta anhand des Übergangs zu den Sekundärkratern gut erkennen. Im nordwestlichen wie im südöstlichen Sektor ist die Grenze der kontinuierlichen Ejekta allenfalls nur zu schätzen. Einige ältere Krater (*ApAc*) sind durch die kontinuierlichen Ejekta teilweise oder auch vollständig überdeckt worden. Bei letzteren scheinen ihre Umrisse noch durch. Sie sind in der Karte durch die Struktureinheit *ghost crater* gekennzeichnet.

Sekundärkrater und -ketten sind besonders im südwestlichen Sektor ausgeprägt, etwas weniger im Nordosten und Osten. Im Süden sind keine vorhanden (fehlende Bildabdeckung), ebenso scheint der Nordwestsektor frei von Sekundärkratern zu sein. Eine "verbotene" Zone in richtiger Lage zur Flugbahn ist nicht zu erkennen.

Das vorwiegende Auftreten ausgeprägter, bis zu 50 km langer Ketten im Südwestsektor ist verträglich mit einem von Osten unter schrägem Winkel auftreffenden Projektil. Die bis zu 50 km langen und mehrere Kilometer breiten Ketten von Sekundärkratern überlagern die Einheiten des Nachbarkraters Har. Daraus folgt klar die relative Altersbeziehung zwischen den beiden Kratern (vergl. *Greeley et al.*, 2000b).

Bei einigen Nordost-Südwest verlaufenden Lineamenten und Furchen innerhalb der kontinuierlichen Ejekta (in der Karte angegeben durch: *linear features: fractures and secondary chains*) handelt es sich vermutlich meist nicht um eine durch Auswurfsmaterial entstandene Impaktkulptur, sondern eher um tektonische Bildungen (hierzu mehr in Abschnitt 8.6.11).

Drei weitere Einheiten innerhalb des Kraterandes von Tindr wurden unterschieden, die nicht exakt axialsymmetrisch zum Kraterzentrum liegen: **Vtif - floor material**, **Vtip - material of irregular pits**, und **Vtic - central pit material**. Der Kraterboden (*Vtif*) ist weitgehend glatt mit vereinzelt hellen Massiven. Eine leichte Aufwölbung des Bodens scheint vorhanden zu sein, lässt sich aber mangels topographischer Daten nicht nachweisen. Auf dem Kraterboden liegen nur wenige jüngere kleine Krater. Material ist an einigen Stellen vom Kraterrand nach innen gerutscht. Im Nordost-Sektor sind Ansätze von Terrassen erkennbar. Der Kraterrand ist teilweise abgetragen, vor allem im südöstlichen Sektor. Der bereits fortgeschrittenere Erosionszustand von Tindr rechtfertigt bei niedrigerer (regionaler) Bildauflösung die Zuordnung zur Erosionsklasse c_2 (vergl. *Bender et al.*, 1997b) bzw. zur chronostratigraphischen Einheit *VAc*.

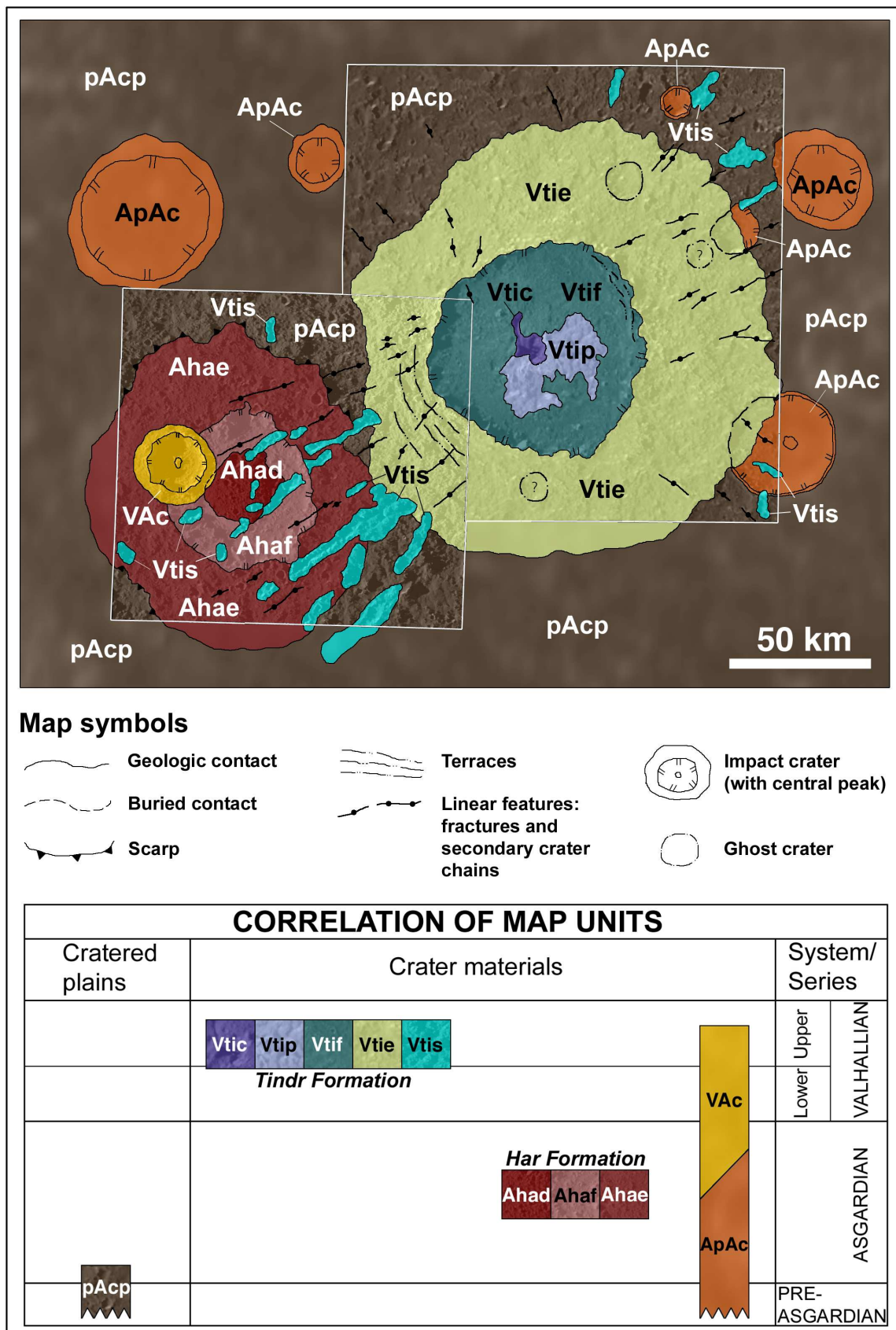


Abbildung 8.47.: Geologische Karte und stratigraphisches Korrelationsdiagramm der Krater Har und Tindr.

Tindr wird von *Greeley et al.* (2000b) als Krater mit Zentralmulde beschrieben⁶⁹. Ziemlich genau im Kraterzentrum befindet sich eine 5 x 8 km große, elliptische Vertiefung mit etwa Nord-Süd ausgerichteter Längsachse. Diese könnte als Zentralmulde (*Vtic*) interpretiert werden. Allerdings weicht ihre Größe und Form stark von der in anderen Kratern ab. Es fehlt ein ausgeprägter Rand. Von der Mulde nach Westen etwas abgesetzt befindet sich eine mindestens 800 Meter hohe "Felsnadel", deren Höhe in der gleichen Größenordnung liegt wie die Tiefe des Kraters (Messung von Schattenlängen). Für einen Zentralberg fehlt die typische Form (annähernd Kegelform, oder Gruppen von Kegeln). Es ist möglich, dass es sich um den stehengebliebenen Rest eines ehemaligen Muldenrandes handelt. Mulde und "Felsnadel" sind umgeben von einem Gebiet, das durch irregulär geformte Vertiefungen (*pits*; Einheit *Vtip*) charakterisiert und vom Zentrum des Kraters nach Osten versetzt ist.

Obwohl Tindr eher dem Typus der regulären Krater angehört, deuten die Massive (einschließlich der Felsnadel) und die irregulären Vertiefungen auf Formen, die denen in Dom-Kratern (z.B. Doh und Neith auf Ganymed (*Wagner et al.*, 1998b)) ähneln. Die Vertiefungen könnten dem in diesen Kratern zu beobachtenden Kranz aus Blöcken und Furchen entsprechen, die eine Zentralmulde bzw. einen zentralen Dom umgeben. In Tindr sind sie jedoch kaum noch ausgebildet. Ursache könnte eine weiter fortgeschrittene Krustenentwicklung sein (siehe weiter unten und Bild 8.49).

Im Tindr südwestlich benachbarten, etwa 50 km großen Krater Har sind drei Schichtglieder der **Har Formation** zu unterscheiden: **Ahad - dome material**, **Ahaf - floor material**, und **Ahae - ejecta material**. Alle diese Einheiten sind überlagert von Sekundärkratern (*Vtis*) des jüngeren Kraters Tindr. Der Dom im Zentrum Har's (*Ahad*) weist etwa 25 km im Durchmesser auf und erhebt sich 200 - 300 Meter über dem Kraterboden (Schattenmessungen). Der den Dom umgebende Kraterboden (*Ahaf*) erscheint rauher als der Tindr's, bedingt durch die zahlreichen Sekundärkrater und durch den topographische Unterschiede verstärkenden niedrigen Sonnenstand. Auch der Rand Har's ist nicht genau kreisrund, sondern verjüngt sich entlang einer NW-SE verlaufenden Achse nach Südosten und lässt auf einen schiefwinkligen Einschlag aus nordwestlicher Richtung schließen. Der Rand ist außerdem stärker abgetragen als bei Tindr, entsprechend dem höheren Alter.

Auffallend ist in den kontinuierlichen Ejekta (*Ahae*) eine an manchen Stellen zu beobachtende, nach außen leicht abfallende Steilstufe (in Abb. 8.47 als *Scarp* angegeben), vor allem im nördlichen und südwestlichen Sektor. Har könnte damit einen Vertreter der so genannten Sockelkrater (*pedestal crater*) darstellen (*Horner und Greeley*, 1982; *Moore et al.*, 1998; *Schenk et al.*, 2004).

Nach der in Abb. 8.47 gegebenen Kartierung und Interpretation ist Har ein einfacher Dom-Krater, bestehend aus Dom, Kraterboden und Ejekta. Es sind jedoch Anzeichen festzustellen, dass Har den in Bild 5.7 (Abschnitt 5.4.5) gezeigten Formen oder dem Dom-Krater Doh ähnlich ist. Demnach entspräche der Krater"rand" von Har in Wirklichkeit dem Rand der Zentralmulde, umgeben nicht von den Ejekta (*Ahae*), sondern von einer noch zum Kraterboden gehörenden Einheit. Für diesen Fall müsste der eigentliche Kraterrand weiter außen liegen. Bei Dom-Kratern wie Doh oder Neith (Ganymed) ist der eigentliche Kraterrand gerade noch zu identifizieren

⁶⁹Die von den Autoren angegebenen Kraterdurchmesser von 105 km für Tindr und von 82 km für Har sowie der in *Fig. 9* eingezeichnete Maßstab sind falsch !

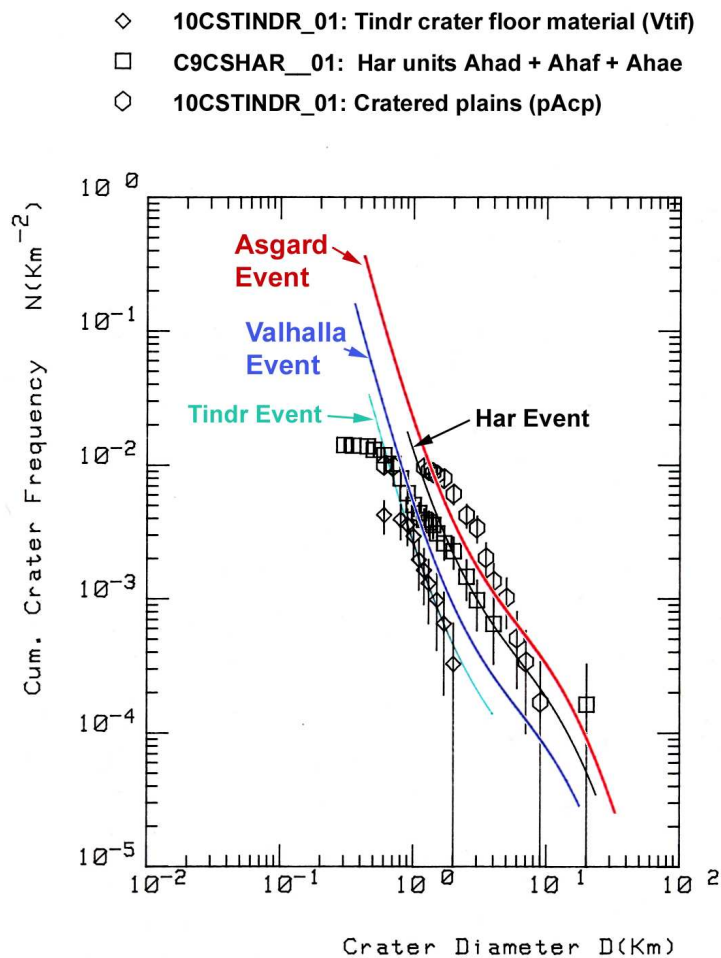


Abbildung 8.48.: Kumulative Häufigkeiten der in den Kratern Har (SSI-Zielgebiet C9CSHAR_01), Tindr (Zielgebiet 10CSTINDR_01) und Umgebung gemessenen geologischen Einheiten; *Tindr*: Kraterböden (*Vtif*); *Har*: Dom, Boden und kontinuierliche Ejekta (Summe *Ahad* + *Ahaf* + *Ahae*); Kratererebenen der Umgebung (*pAcp*). Das Diagramm verdeutlicht die stratigraphische Abfolge der beiden Krater zueinander und zu den beiden Einschlagsbecken Valhalla und Asgard (nur Kurven). Siehe Text mit weiteren Erläuterungen.

(Wagner *et al.*, 1998b; Schenk *et al.*, 2004). In den SSI-Daten gibt es aber keine Hinweise auf einen möglicherweise größeren Kraterrand von Har, da die Bildabdeckung hierzu nicht ausreicht. Nach den Voyager-Daten könnte man aber einen "Ring" vermuten, der auf einen größeren Krater von mindestens 80 bis 100 km hindeutet (vergl. Abb. 8.49).

In Tabelle 8.4 sind die kumulativen Häufigkeiten und Modellalter der Schichtglieder von Har und Tindr aufgelistet, soweit sie statistisch verwertbare Messungen ergaben. Die zeitstratigraphische Zuordnung der beiden Krater ist im kumulativen Häufigkeitsdiagramm 8.48 dargelegt. Tindr ist aufgrund der Messungen auf dem Kraterboden (*Vtif*) und auf den kontinuierlichen Ejekta (*Vtie*) post-Valhallisch und im Alter Lofn vergleichbar. Die in den kontinuierlichen Ejekta noch erkennbaren größeren Krater gehören dagegen dem älteren prä-Asgardischen System an.

Geol. Einheit	N_{cum} ($D \geq 1$ km)	Model I [Ga]	Model IIa [Ga]	Model IIb [Ga]
<u>Tindr:</u>				
<i>Vtif</i>	$2.75 \cdot 10^{-3}$	3.87	1.26 (3.66, 0.29)	2.69 (4.25, 1.17)
<i>Vtie</i> ⁽¹⁾	$6.20 \cdot 10^{-3}$	4.00	2.36 (4.44, 0.62)	3.95 (4.55, 2.23)
	$1.90 \cdot 10^{-2}$	4.17	4.1 (4.56, 1.65)	4.55 (4.56, 3.98)
<u>Har:</u>				
<i>VAc</i> ⁽²⁾	$< 7.30 \cdot 10^{-4}$	< 3.62	< 0.38 (1.6, 0.08)	< 0.96 (2.32, 0.35)
<i>Ahae</i>	$9.87 \cdot 10^{-3}$	4.07	3.13 (4.55, 0.94)	4.37 (4.56, 2.99)
<i>Ahaf</i>	$3.55 \cdot 10^{-3}$	3.91	1.56 (4.0, 0.37)	3.12 (4.42, 1.46)
	$1.45 \cdot 10^{-2}$	4.13	3.73 (4.56, 1.32)	4.52 (4.56, 3.61)
<i>Ahad</i>	$5.55 \cdot 10^{-2}$	4.32	4.55 (4.56, 3.33)	4.56 (4.56, 4.56)
Summe ⁽³⁾	$1.25 \cdot 10^{-2}$	4.10	3.51 (4.56, 1.16)	4.48 (4.56, 3.38)
<u>CP</u> ⁽⁴⁾				
<i>pAcp</i>	$2.99 \cdot 10^{-2}$	4.23	4.46 (4.56, 2.31)	4.56 (4.56, 4.38)

Tabelle 8.4.: Kumulative Häufigkeiten und Modellalter der Krater Har und Tindr. Die *Model-I*-Alter des Tindr- und Har-Events sind in Fettdruck hervorgehoben (entsprechend der angefitzten Kurve in Bild 8.48). ⁽¹⁾Die Messung auf der Tindr-Einheit *Vtie* ergab zwei unterschiedliche Alter. ⁽²⁾Das (maximale) Alter für den Har überlagernden Krater der Einheit *VAc* wurde abgeschätzt. Die Zeile Summe⁽³⁾ umfasst die drei Einheiten der Har-Formation. CP⁽⁴⁾: Kraterebenen der Umgebung, gemessen auf den SSI-Daten.

Har ist mit Ausnahme des Doms (*Ahad*) durch die Messungen in den beiden Einheiten *Ahaf* und *Ahae* klar dem Asgardischen System zuzuordnen (Bild 8.48 und Tabelle 8.4). Die auf dem Dom gemessene Kraterhäufigkeit ist wegen der relativ kleinen Messfläche zu hoch. Aus den beiden anderen Einheiten (*Ahaf* und *Ahae*) lässt sich gut eine Zuordnung zum Asgardischen System ableiten. Gleiches gilt für die Summe der drei Einheiten, wie in Bild 8.48 gezeigt.

Die Har und Tindr umgebenden Kraterebenen sind prä-Asgardisch (ohne angefitzte Kurve dargestellt in Abb. 8.48). Dies geht sowohl aus der Messung der in den SSI-Daten relativ kleinen erfassten Fläche, insbesondere aber aus Messungen des Voyager-Kontexts hervor.

Weitere in der geologischen Karte (Abb. 8.47) enthaltene größere Krater gehören (mit einer Ausnahme) zur Erosionsklasse c_1 bzw. zu *ApAc*. Der Har auflagernde (unbenannte) Krater mit scharfem Rand und Zentralberg wurde durch Abschätzung der Kraterhäufigkeit auf dem sichtbaren Teil des Bodens als Krater der oberen Valhallischen Serie (vergl. Tabelle 8.4) bestimmt und der Einheit c_2 bzw. *VAc* zugeordnet.

Abbildung 8.49 zeigt drei mögliche Erklärungsmodelle für die morphologischen Unterschiede zwischen den beiden Kratern Har und Tindr. In Panel 1 ist der zeitliche Unterschied im Alter und in der Krustenentwicklung dargelegt. Zwischen den Entstehungszeiten t_1 von Har und t_2 von Tindr hat sich die Kruste weiter verfestigt. Aus der annähernd gleichen Größe der beiden Krater ist zu vermuten, dass beide Impaktoren ebenfalls annähernd gleich groß gewesen sein könnten. Zum Zeitpunkt des Har-Events war die Kruste in der Zone, in die der Har-Impaktor vordringen konnte, noch plastischeres Material vorhanden, beim Tindr-Event nicht mehr. Aller-

dings könnte diese Verfestigung zumindest noch nicht vervollständigt gewesen sein, da auch in Tindr Ansätze von aus Dom-Kratern bekannten Formen erkennbar sind. Hierzu gehören z. B. die unregelmäßigen Vertiefungen und auch der etwas nach oben gewölbte Kraterboden.

Aus dem stratigraphischen Verhältnis nur zweier unterschiedlich geformter Krater lässt sich aber nicht generell der Schluss ziehen, die Veränderung in den Formen sei allein bedingt durch Veränderung der Rheologie mit der Zeit. Gegenbeispiel hierzu ist Doh, ebenfalls ein Dom-Krater, aber von vergleichbarem Alter wie Tindr (vergl. Abschnitte 8.5.2 und 8.5.3).

Plastischeres Material in Form von "Matsch" (*slush*) könnte im Untergrund in Taschen (*pockets*) konzentriert sein, wie von *Greeley et al.* (2000b) vermutet. Der Unterschied in der Morphologie zwischen Har und Tindr beruht demnach darauf, dass der Har-Impaktor beim Einschlag in eine derartige "Tasche" traf, der Tindr-Impaktor dagegegen nicht, wie Panel **2** in Abb. 8.49 darlegt.

Eine dritte Variante ist mit den vorliegenden Bilddaten nicht näher überprüfbar. Die Daten von Voyager-1 suggerieren einen mehr oder weniger deutlichen Ring mit 80 - 100 km Durchmesser (Panel **3** in Abb. 8.49), der aber in den SSI-Daten nicht zu sehen ist. Man könnte dies, wie bereits weiter oben erwähnt, analog zu anderen Dom-Kratern (Doh; Neith) als den eigentlichen Kraterrand interpretieren, während der die Mulde umgebende Rand der Umrandung einer Zentralmulde mit dem Dom im Zentrum entspricht. Die "Ejekta" entsprechen dem Kraterboden, der aufgewölbt ist und an einigen Stellen nach außen eine Art Sockel bildet. Eine vergleichbare Bodenform ist beim Zentralmuldenkrater Lugalmeslam auf Ganymed zu beobachten (abgebildet, aber Sockel nicht erwähnt in *Pappalardo et al.*, 2004, Fig. 16.21d)⁷⁰.

Der vorliegende SSI-Bilddatensatz reicht nicht aus, eine zeitliche Änderung rheologischer Parameter der Oberfläche und der oberen Kruste (bis zur maximalen Eindringtiefe) von Projektilen nachzuverfolgen. Dafür sind in jedem Fall weitere Daten notwendig, am geeignetsten durch eine globale Abdeckung mit einer Auflösung von mindestens 100 m/pxl und mit wesentlich mehr Möglichkeiten, die Oberfläche in Stereo zu sehen.

8.5.7. Geologische Prozesse in der Asgardischen Periode

Die Asgardische Periode begann nach beiden Krater-Chronologiemodellen vor mehr als 4 Milliarden Jahren (*Model I*: 4.19 Ga; *Model IIa*: 4.3 Ga). In *Model I* vergingen zwischen der Entstehung der beiden größten Multiringstrukturen auf Callisto Asgard und Valhalla etwa 200 Millionen Jahre. Die Zeit zwischen diesen beiden großen Einschlägen war geprägt durch (1) intensives Meteoritenbombardement, sehr wahrscheinlich mit einer exponentiell abfallenden Einschlagsrate, (2) durch Erosions- und Abtragungsprozesse, (3) durch tektonische Deformation zumindest in Zusammenhang mit großen Impaktereignissen, und (4), allerdings mit einem sehr großen Fragezeichen versehen, durch vereinzelt auftretende kryovulkanische Aktivität.

Asgard ist neben Valhalla das einzige größere durch Kraterhäufigkeiten gut datierbare Multiringbecken. Das Asgard überlagernde Becken bzw. Palimpsest Utgard ist mindestens dem Asgard-

⁷⁰Hier aber zu beachten, dass als "Sockelkrater" oder *pedestal craters* nur solche Formen bezeichnet werden, die einen deutlichen Sockel in ihren kontinuierlichen Ejekta aufweisen (wie beschrieben z. B. in *Moore et al.*, 1998).

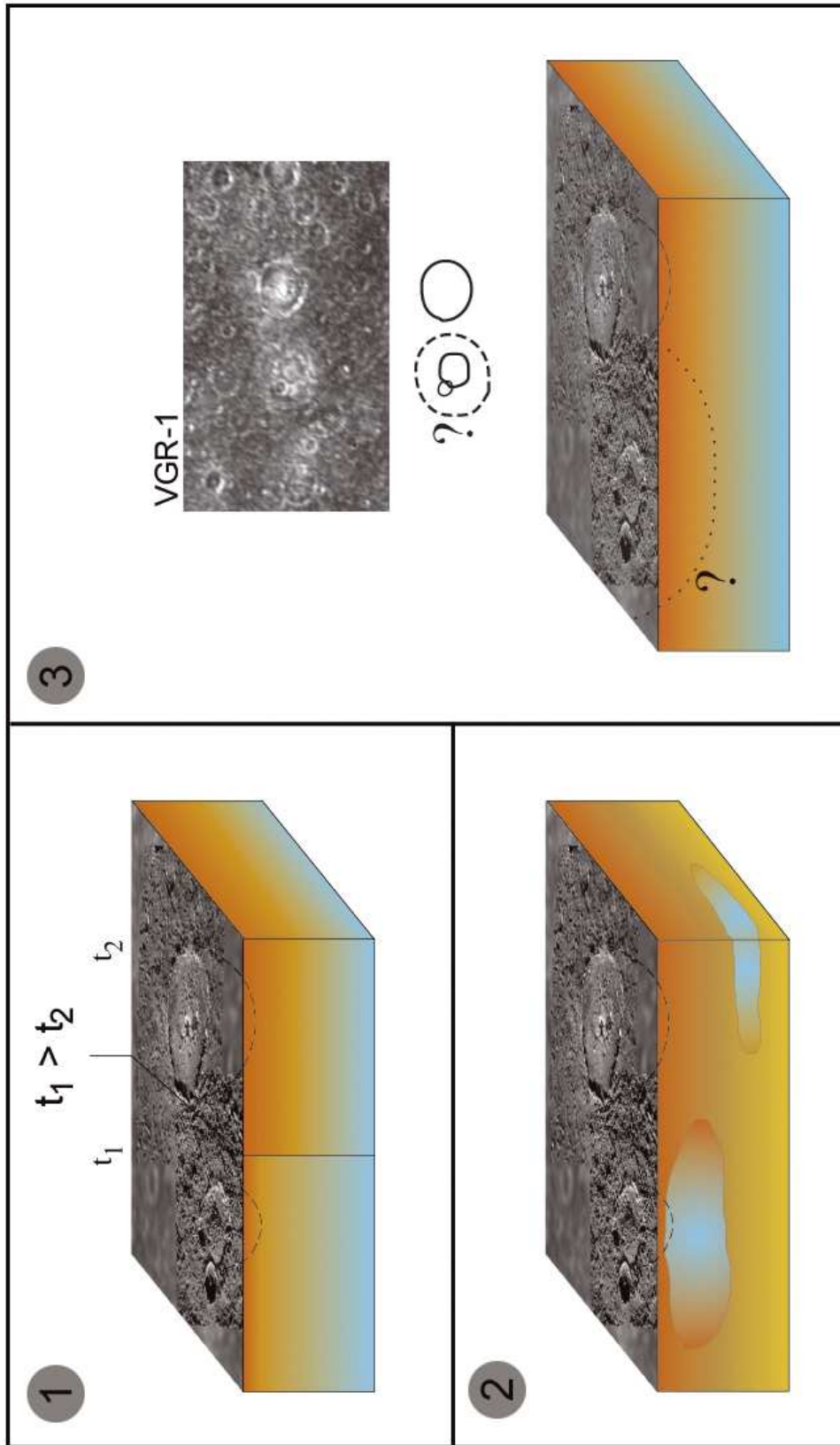


Abbildung 8.49.: Entstehungsmodelle der Krater Har und Tindr. **1** Zunehmende Verfestigung der Kruste mit der Zeit. **2** Konzentration von Eis oder "Matsch" (slush) in Taschen (Pockets) (Greeley *et al.*, 2000b). **3** Ein möglicher größerer Durchmesser von Har könnte aus den Daten von Voyager-1 ersichtlich sein. Beim Einschlag wurde dabei eine größere Tiefe und plastischeres Material erreicht.

schen System zuzuordnen, lässt sich aber kaum datieren, da der junge Strahlenkrater Burr und seine Ejekta diese Struktur beinahe vollständig überdecken (vergl. Bild 8.2 in Abschnitt 8.2.2). Weitere Becken, nur noch durch stark abgetragene Furchen in den Kraterebenen erkennbar, gehören zum überwiegenden Teil bereits dem nächstälteren System an (Abschnitte 8.6.1 ff.).

Bemerkenswert erscheint, dass sich die Kruste in der Zeit zwischen den beiden Einschlägen von Asgard und Valhalla nicht wesentlich weiter verfestigt hat, wie aus den ähnlichen Abständen und Breiten der Grabenstrukturen in beiden Becken hervorgeht. Dies spricht (1) für einen zeitlich nicht zu großen Abstand zwischen beiden Becken und (2) für ein hohes Alter von Valhalla von ca. 4 Ga, wie es *Model I* fordert. Ein Altersunterschied von ca. 2.3 Ga zwischen Asgard und Valhalla mit einem Alter von nur 2.15 Ga für Valhalla, wie aus der Anwendung von *Model IIa* folgt, kann dagegen den dazu erforderlichen hohen Wärmefluss auf einem geologisch seit der Frühzeit "toten" Objekt wie Callisto nicht ausreichend erklären.

Hellere, annähernd kreisförmige oder polygon-förmige Flecken entsprechen mit hoher Wahrscheinlichkeit Palimpsesten. Sie wurden in den wenigen höher aufgelösten Zielgebieten nicht oder nur ausnahmsweise erfasst (etwa in 20CSDRKFL002, vergl. Abb. 8.44). In den regional aufgelösten SSI- oder Voyager-Daten sind sie in auffallend großer Zahl erkennbar, aber nur in Ausnahmefällen mit Kraterhäufigkeiten zu datieren. Die Entstehung von Palimpsesten anstelle von regulären Kratern oder Penepalimpsesten erforderte die Mobilisierung plastischen Materials beim Einschlag und/oder eine rasche und vollständige viskose Relaxation, Prozesse, die nur mit einem höheren Wärmefluss in der Frühzeit verträglich sind (*Passey und Shoemaker, 1982; Greeley et al., 1982; Schenk et al., 2004*). Dass auf Callisto mehr, aber verglichen mit Ganymed stärker abgetragene Palimpseste vorhanden sind, als bisher vermutet (vergl. z. B. *Schenk et al., 2004*), lässt auf einen vergleichsweise hohen Wärmefluss auch auf Callisto schließen. Die Bildung von Palimpsesten vollzog sich höchstens bis zum Ende der Asgardischen Periode. Einige der in regionaler Bildauflösung zur Einheit *VAp* gruppierten Palimpseste ließen sich aufgrund ihrer Kraterhäufigkeiten in das Asgardische System (als Einheit *Ap*) einordnen. Jüngstes nachzuweisendes Palimpsest ist mit einem *Model-I*-Alter von 3.98 Ga die bereits in Abschnitt 8.4.4, Bild 8.21 dargestellte Struktur Kol Facula⁷¹.

In der Asgardischen Periode bildeten sich neben den regulären Kratern (*VAc*) Dom-Krater oder Penepalimpseste (*VAd*). Der etwa 50 km große Dom-Krater Har wurde in *Model I* mit etwa 4.1 Ga datiert. Die Bildung dieser besonderen Kraterformen setzte sich aber mindestens noch in das Valhallische System fort, wie Datierungen des Asgard überlagernden Dom-Kraters Doh (3.87 Ga in *Model I*) und eines weiteren größeren Dom-Kraters, Jalkr (Zielgebiet G8CSVGRGAP01, 38.4° Süd, 82.6° West), 3.96 Ga (*Model I; Wagner et al., 1999*) belegen.

Sublimationsverwitterung und eine sehr wahrscheinlich hohe Impaktrate führten zu intensiven Erosions- und Abtragungsprozessen, die sich bis in die Valhallische Periode fortsetzten. Auf geologischen Einheiten, die dem Asgardischen System zuzuordnen sind, ist dies in den kumulativen Häufigkeitsverteilungen nachzuweisen. Bei Kraterdurchmessern unterhalb von 1 - 2 km wird die Steigung der Verteilung deutlich flacher. Krater oberhalb dieses Grenzdurchmessers erscheinen

⁷¹Aufgrund des Fehlers von ± 0.05 Ga ist dieses Palimpsest nicht exakt dem Valhallischen oder Asgardischen System zuzuordnen.

ebenfalls teilweise stark abgetragen, sind in einigen wenigen Gebieten aber noch erkennbar und gehen dadurch in die Kraterstatistik mit der Steigung einer steilen Produktionsverteilung (oder auch einer Equilibriumsverteilung) ein.

Ursache lobenförmiger Ablagerungen, meist im Innern von Kraterrändern (vergl. Abb. 8.37, **H**) sind nach Ansicht von *Chuang und Greeley* (2000) eine Folge der Sublimationsverwitterung. Die Autoren beschrieben einen Prozess, in dem sich nach Entstehung eines Kraters in einem Gemisch aus "Fels" und Eis (Wassereis zusammen mit anderen flüchtigen Substanzen, z. B. CO₂) die volatilen Substanzen verflüchtigen und ein dunkler Rückstand auf dem "Fels"-Eis-Gemisch zurückbleibt. Die Sublimation dieser Substanzen ist zum einen ein Temperatureffekt über einen Callisto-Tag, wie *Moore et al.* (1999) beschreiben, zum anderen auch bedingt durch nachfolgende Impakte (*Chuang und Greeley*, 2000). Da die flüchtigen Substanzen auch an den Kraterrändern exponiert sind, kommt es hier zu rückschreitender Erosion, als deren Folge das Gelände schließlich so steil werden kann, dass der aufliegende dunkle Verwitterungsrückstand ins Kraterinnere stürzt. *Chuang und Greeley* (2000) vermuteten, dass diese Hangrutsche zusätzlich durch die bei Impakten entstehende seismische Energie "getriggert" werden könnten.

Unter der Annahme des mond-ähnlichen Impaktszenarios von *Model I* scheint die Erosionsrate mit der hohen Einschlagsrate gekoppelt zu sein. Sie setzte sich aus der vorangehenden prä-Asgardischen Periode bis in die spätere Valhallische Epoche fort und nahm ab, als auch die hohe Einschlagsrate abklang. Der dabei durch Verwitterungs- und Abtragungsprozesse entstandene dunkle Rückstand weist bei den kleinen Kratern im Durchschnitt ein einheitliches Alter (3.5 - 3.6 Ga in *Model I*) auf, wie in Abschnitt 8.6.9.1 näher diskutiert wird.

Tektonische Prozesse waren in erster Linie an Impaktereignisse gebunden. Während der Asgardischen Periode lag die Mächtigkeit der Lithosphäre, zu ermitteln aus den durchschnittlichen Breiten und Abständen der Ringgräben Asgards, wie in der späteren Valhallischen Periode bei etwa 15 - 20 km (vergl. *McKinnon und Melosh*, 1980; Abschnitt 8.4.9). Die in Valhalla zu beobachtenden zu den Ringgräben parallelen Strukturen sind auch in Asgard vorhanden, allerdings wesentlich stärker abgetragen und daher schwerer nachzuweisen. Bei der Entstehung und Formung der Asgard-Impaktstruktur waren somit die gleichen Mechanismen am Wirken wie beim jüngeren Valhalla-Becken, zudem folgt eine ähnliche Schichtung in rheologisch unterschiedliche Materialien, wie die den Grabenrändern parallelen Strukturen andeuten.

Nach wie vor ungelöst bleibt die Frage, ob kryovulkanische Prozesse stattgefunden haben. Zwei geologische Einheiten werden hierfür als Indikatoren angesehen (*Greeley et al.*, 2000b): (a) dunkle, glatte Gebiete mit wenigen Zehnerkilometern Ausdehnung, und (b) hellere, glatte Gebiete. Bei regionaler Auflösung (etwa 2 - 0.5 km/pxl) suggerieren die weitgehend glatte Oberfläche, die Überdeckung von Kratern, teilweise fast vollständig bis zum Rand, oder das "Umfließen" von Kratern (*embayment*) eine Überprägung durch Eisvulkanismus. Bei der dunkleren Variante zeigen höher aufgelöste Daten zumindest in einem Fall (Zielgebiet 20CSDRKFL001), dass das dunkle Material nicht völlig glatt ist, sondern aus Kuppen und Vertiefungen besteht (*Wagner et al.*, 2000). Erosion und Abtragung topographisch höher gelegener, aus einem Gemisch von Wassereis und dunkleren Bestandteilen zusammengesetzten Einheiten erscheint als die wahrscheinlichste Erklärung, wobei nur noch die vom dunklen Rückstand bedeckten Rümpfe der einstmals höheren hellen Gebiete (Massive) übrigbleiben.

Asgard wird umgeben von Kraterebenen, die nach Kraterhäufigkeitsmessungen auf größeren zusammenhängenden Gebieten entweder älter als Asgard sind (z. B. die südlich an das Becken anschließenden Ebenen) oder ein Asgardisches/post-Asgardisches Alter aufweisen (*Wagner und Neukum, 1994b; Wagner et al., 1997*). Der folgende Abschnitt 8.6 befasst sich mit der Stratigraphie der Kraterebenen, den ältesten geologischen Einheiten auf Callisto. Im Detail (d. h. bei hoher Auflösung) werden dabei aber auch Einheiten und geologische Prozesse mit erfasst, die dem jüngeren Valhallischen System zuzuordnen sind.

8.6. Prä-Asgardisches System

8.6.1. Typlokalitäten

Bei mittlerer Bildauflösung (1 - 3 km/pxl) der Voyager- und SSI-Daten erscheinen die in Abschnitt 5.4.2 eingeführten Kraterebenen (**cratered plains**) relativ einheitlich. Einzelne hellere und dunklere Bereiche sind aber zu unterscheiden (*Schenk und McKinnon, 1985; Wagner und Neukum, 1994a,b; Schenk, 1995*).

Im Grunde ließe sich fast jeder Bereich außerhalb der Multiringbecken Asgard oder Valhalla als Typlokalität der Kraterebenen definieren, da zumindest in regionaler Bildauflösung relativ geringe Unterschiede zwischen einzelnen Regionen bestehen. Hier wurden die beiden folgenden Gebiete als Typlokalitäten ausgewählt: (1) eine äquator-nahe Region östlich Valhallas auf der Jupiter zugewandten Hemisphäre, da hiervon auch Voyager-Farbdaten in mittlerer Auflösung existieren, und (2) eine von der SSI-Kamera während der achten Umrundung (G8) in Daten des Clear-Filters aufgenommene Region.

Bild 8.50 zeigt die östlich Valhallas gelegene Typlokalität der Kraterebenen in einer HSI-Darstellung aus Voyager-Farbdaten mit etwa 3 km/pxl Auflösung. Die hohe Farbkorrelation der drei Filter Grün (GR), Blau (BL) und Violett (VI)⁷² lässt sich auch durch eine HSI-Transformation nur wenig verbessern. Zur Verstärkung des Kontrastes und der Kanten wurde die Intensitätskomponente vor der Rücktransformation in den RGB-Raum mit einem Scene-Filter bearbeitet (vergl. Abschnitt 7.2.4.2, Gleichungen 7.6 und 7.9).

Zu den auffälligsten Geländemerkmale dieses Gebiets gehört neben den Valhalla-Grabenstrukturen (am östlichen Rand des Beckens) die Kraterkette *Eikin Catena* (**EiC** in Bild 8.50). Die größten Krater des Gebiets sind im Durchmesser bis zu 80 km groß. Die Region enthält, neben den von SSI aufgenommenen Kratern Har (**H(C9)**) und Tindr (**T(C10)**) zwei weitere SSI-Zielgebiete höherer Auflösung (Punktsignatur): (a) eine Detailbeobachtung der Kraterebenen mit 156 m/pxl Auflösung (in Orbit **C9**), und (b) eine von *Bender et al. (1997b)* als *smooth plains* bezeichnete Einheit (mit jeweils 270 m/pxl bzw. 68 m/pxl in Orbit **C10**).

Während der achten Umrundung nahm die SSI-Kamera ein von Voyager in nur geringer Auflösung und unter schrägem Blickwinkel erfasstes Gebiet in den hohen südlichen Breiten der Jupiter zugewandten Hemisphäre auf. Die Auflösung dieses Zielgebiets G8CSVGRGAP01 (*Voyager gap*

⁷²Andere als diese drei Filter sind von Voyager-1 in der gegebenen Auflösung nicht verfügbar.

VGR-1 color mosaic (HSI): GR = R BL = G VI = B

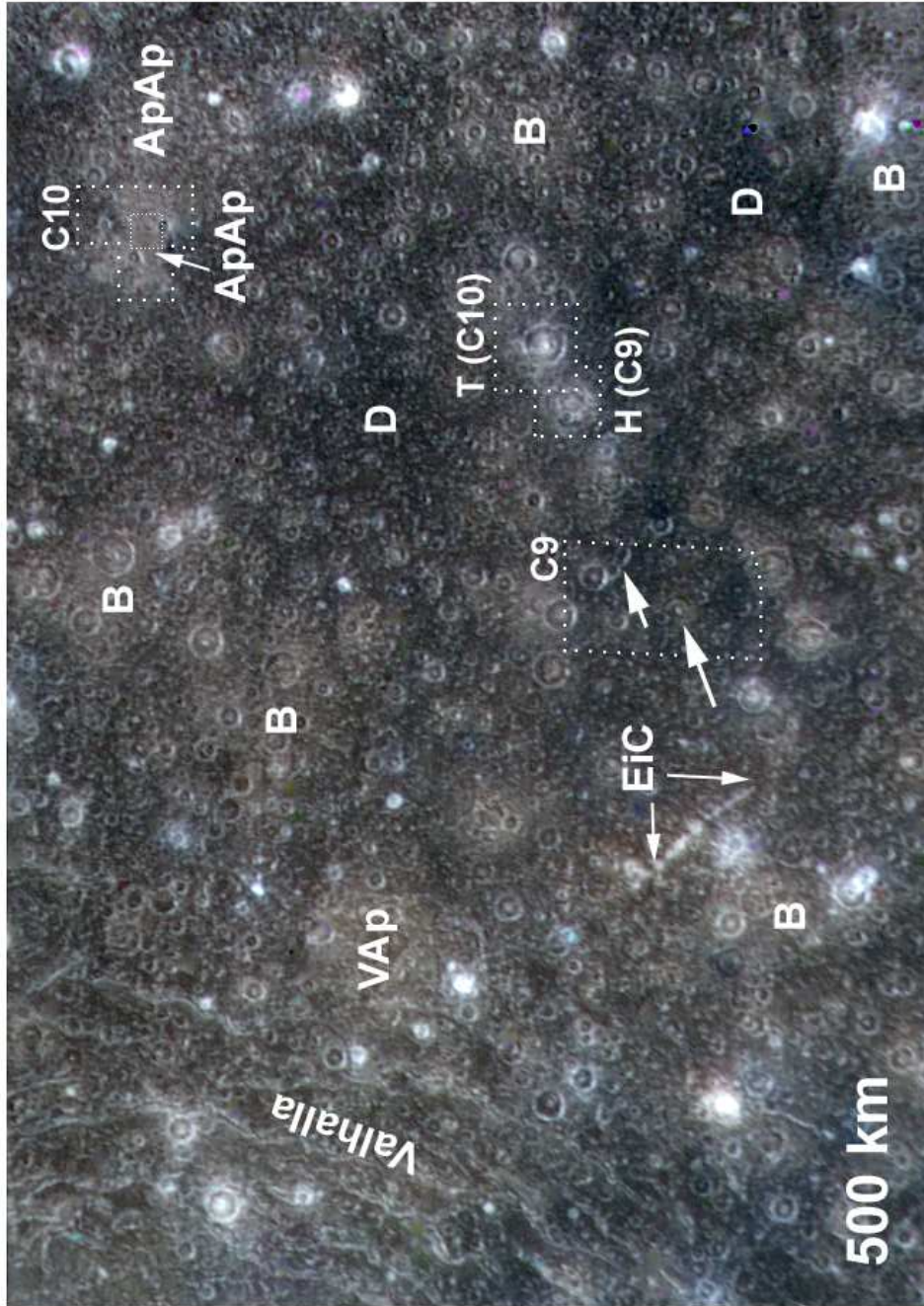


Abbildung 8.50.: Typlokalität der Kratererebenen (1): Voyager-1-Farbmosaik der Region östlich des Valhalla-Beckens. Bildzentrum etwa bei 2° N, 8° W. Farbfilterdaten des Grün-, Blau- und Violet-Filter (Bildnummern: 1753J1+000 (GR), 1751J1+000 (BL), 1749J1+000 (VI)) in HSI-Darstellung; Gestrichelt eingezeichnet: SSI-Zielgebiete hoher Auflösung (mit Orbit-Angabe). **D:** dunklere Variante und **B:** hellere Variante der Kratererebenen; **ApAp:** alte, abgetragene Palimpseste. **H:** Dom-Krater Har, **T:** Krater Tindr. Zur Bedeutung der Pfeile innerhalb des C9-Zielgebiets siehe Beschreibung der Abbildung 8.63 (Abschnitt 8.6.8). Weitere Erläuterung im Text.

fill) aus insgesamt 15 Bildern (Footprint 3x5) beträgt im Durchschnitt etwa 980 m/pxl. Etwas weiter nach Osten grenzt es an das Zielgebiet G8CSADLINDA01 (890 m/pxl, Footprint 3x4), in dem das Lofn-Becken liegt. Nach Süden schließt sich das Zielgebiet G8CSSPOLAR01 an (670 m/pxl, Footprint 3x4 + 1; zur Lage dieser drei Zielgebiete siehe Abschnitt 5.4.3 und Bild 5.5).

Bild 8.51 zeigt einen Ausschnitt des G8CSVGRGAP01-Mosaiks. Dieses Gebiet enthält neben regulären Kratern mit Durchmessern bis zu 80 km, z. B. *Audr* (**Au**) oder *Thorir* (**Th**), auch zwei größere Dom-Krater bzw. Penepalimpseste, *Jalkr* (**Ja**) und *Barri* (**Ba**). Das einbeschriebene Rechteck gibt die Lage einer weiteren Detailansicht (Bild 8.52) wieder.

8.6.2. Geologie und Stratigraphie der Kraterebenen

In der in Bild 8.50 dargestellten Typlokalität sind drei Einheiten farblich zu differenzieren: (1) hellere, gelblich-ockerfarbene Einheiten (gekennzeichnet durch **B**), (2) dunklere Einheiten in dunkelblauen Farbtönen (**D**), sowie (3) vereinzelt sehr helle Krater in völlig ungesättigter Farbe (d.h. weiß). Die Grenze zwischen den helleren und dunkleren Einheiten ist nicht scharf und meist schwer zu ziehen.

Der Großteil der Krater und Dom-Krater gehört der Erosionsklasse c_2 bzw. der Einheit *VAc* an. Stark abgetragene Krater (Erosionsklasse c_1 bzw. Einheit *ApAc*) oder Kraterruinen sind wegen der geringen Auflösung nicht gut zu erkennen. Lediglich Har und Tindr konnten auf höher aufgelösten SSI-Bilddaten näher untersucht und datiert werden (Abschnitt 8.5.6). Einige der helleren Einheiten, darunter die im Orbit C10 aufgenommenen glatten Ebenen (*smooth plains*; vergl. *Bender et al.*, 1997b), sind alte, abgetragene Palimpseste, deren Kreis- oder Ellipsenform teilweise noch nachzuweisen ist (**ApAp**).

Ein Ausschnitt des Mosaiks des SSI-Zielgebiets G8CSVGRGAP01 mit 980 m/pxl ist in Abbildung 8.51 dargestellt. Auch hier ist in den Kraterebenen eine hellere (**B** in der Abbildung) und eine dunklere Varietät (**D**) zu unterscheiden. Auch hier ist die Grenze zwischen beiden Varietäten nicht scharf und schwer zu ziehen.

Alle drei Erosionsklassen der Krater sind vertreten, darunter der Typ c_2 bzw. *VAc* am häufigsten. Bei den Kratern der Einheit c_3 bzw. *BVc* sind lediglich helle bis sehr helle Ejekta, aber keine Strahlensysteme entwickelt. Einige der helleren Flächen repräsentieren abgetragene Palimpseste (**ApAp**). In einigen Fällen ist diese Interpretation wegen der noch vorhandenen Kreisform eindeutig.

Bei den meisten Kratern sind Zentralmulden ausgebildet. Der etwa 70 km große c_2 -Krater *Audr* (**Au** in Abb. 8.51) besitzt im Gegensatz zu anderen gleichartigen Kratern eine vergleichsweise große Zentralmulde. Dieser Krater stellt einen Übergangstyp zu den Dom-Kratern und Penepalimpsesten dar. Die in Bild 8.51 abgebildete Region enthält zwei solcher Penepalimpseste: die Krater *Jalkr* (**Ja**) und *Barri* (**Ba**).

Der relativ helle Krater *Thorir* (**Th**), der am ehesten der Einheit c_2 bzw. *VAc* zuzuordnen ist, wird von einer kreisbogenförmigen Bruchlinie durchzogen (schwarzer Pfeil in Abb. 8.51).

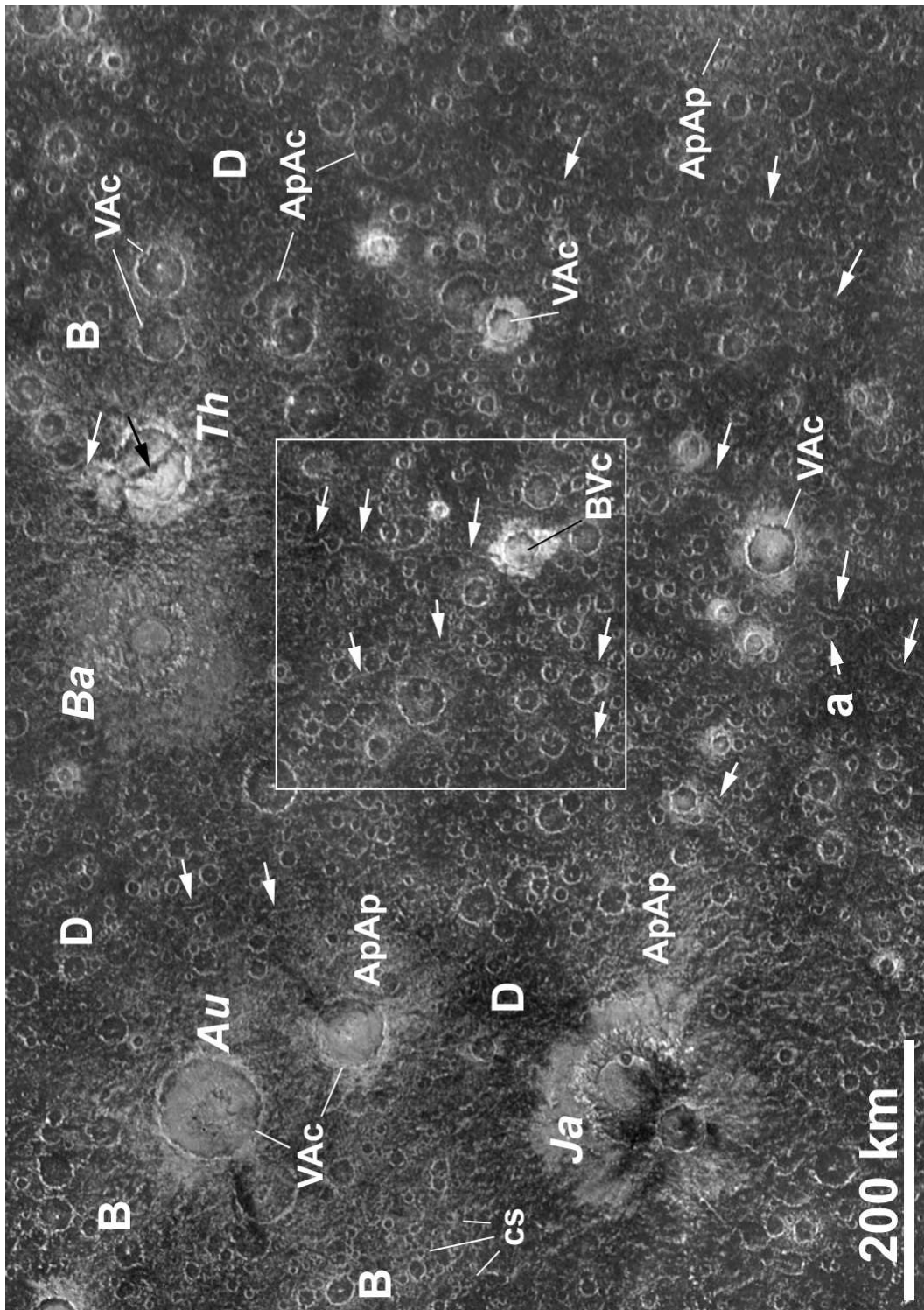


Abbildung 8.51.: Typlokalität der Kraterstufen (2): SSI-Zielgebiet G8CSVGRGAP01. Ausschnitt aus einem Mosaik des gesamten Zielgebietes, Bildnummern G8C0001 bis G8C0009; Bildauflösung 980 m/pxl. Bildzentrum etwa bei 37° S, 72° W. Pfeile: markante Furchenstrukturen alter abgetragenener Ringbecken. Weitere Erläuterung der Symbole im Text.

Außerhalb des Kraters ist diese Bruchlinie weiterzuverfolgen (weißer Pfeil). Da bei einem Impakt alles, was innerhalb des Kraterrandes liegt, zerstört wird, ist die Bruchstruktur somit jünger. Die Bruchstruktur wird, ebenso wie der nördliche Kraterrand von Thorir, weiter durch Ejekta und Rand eines kleineren Kraters überlagert, der noch jünger wie Thorir und die Bruchstruktur ist.

Bereits in den Voyager-Daten sind kreisförmige oder konzentrische Strukturen (Lineamente, Furchen) zu identifizieren, die möglicherweise Reste alter, stark abgetragener und fast völlig zerstörter ehemaliger Multiringbecken unterschiedlicher Größe darstellen. Einige davon wurden bereits von *Passey und Shoemaker* (1982) erkannt und beschrieben. Kartierungen solcher Strukturen bereits in den Voyager-Daten wurden vereinzelt durchgeführt, aber nie veröffentlicht (*Greeley*, 2000, persönliche Mitteilung).

Die höher aufgelösten Daten der G8-Zielgebiete ermöglichen, weitere Multiringstrukturen zu identifizieren. Insbesondere das Zielgebiet G8CSVGRGAP01 enthält eine Reihe solcher abgetragener Ringstrukturen unterschiedlicher Größe. Ihre Hauptmerkmale sind: (1) Furchen mit wenigen Kilometern Breite, die (2) in einigen Fällen *en echelon* angeordnet sind, (3) gekrümmte Albedolineamente anstelle der Furchen, (4) kreisförmige Anordnungen der Furchen oder Lineamente zu "Ringern", die wenigstens über einen Viertelkreis zu verfolgen sind, und (5) weitgehend gleichmäßige Abstände der einzelnen "Ringe" voneinander⁷³.

Einige der in G8CSVGRGAP01 identifizierbaren Furchen sind in Bild 8.51 durch Pfeile angezeigt. Soweit bei gegebener Bildauflösung nachweisbar, werden die Furchen im Regelfall durch Krater überdeckt bzw. unterbrochen und sind damit älter. Ausnahmen kommen jedoch vor (z. B. bei dem durch **a** gekennzeichneten Krater, Abb. 8.51). Die durch Pfeile gekennzeichneten Ringe des gezeigten Ausschnitts gehören wahrscheinlich einem einzigen, sehr großen Becken (mehrere hundert Kilometer Durchmesser) an, dessen Zentrum nordwestlich des Kraters Audr (**Au**) gelegen ist.

Eine Detailansicht des in Bild 8.51 einbeschriebenen Rechtecks zeigt Bild 8.52. Zusätzlich zu den konzentrischen Furchen (horizontale weiße Pfeile) zeigt die Detailaufnahme radiale Furchen, die etwa senkrecht zu den konzentrischen verlaufen und, ähnlich wie das radiale Muster in Valhalla, vermutlich Teil der gleichen alten Impaktstruktur sind (weiße Pfeile mit schwarzem Rand in Abb. 8.52). Ebenso möglich ist, dass sie einem weiteren konzentrischen System angehören, das sich aber nicht nachweisen lässt, da diese radialen Furchen nur an der in Bild 8.52 gezeigten Stelle auftreten.

Wegen der Überlagerung mit jüngeren Einheiten und wegen der meist bereits weit fortgeschrittenen Abtragung ist eine genaue Messung der Grabenbreiten und -abstände schwierig. Die wenigen zuverlässig messbaren Breiten der Gräben oder Furchen liegen in der Größenordnung von 5 bis 10 km. Diesen Werten würde im Sinn der Theorie von *McKinnon und Melosh* (1980) eine Lithosphärenmächtigkeit von durchschnittlich 10 km bei der Entstehung dieser alten Becken

⁷³Derartige Strukturen wurden von J. Klemaszewski (Arizona State University, Tempe, Az.) und dem Autor auf den SSI-Daten des Zielgebiets G8CSVGRGAP01 (ohne die abgetragenen Palimpseste) erstmals kartiert (1997/98). Vorläufige Ergebnisse wurden bei der 23. Jahrestagung der *European Geophysical Society* 1998 präsentiert (*Klemaszewski et al.*, 1998a).

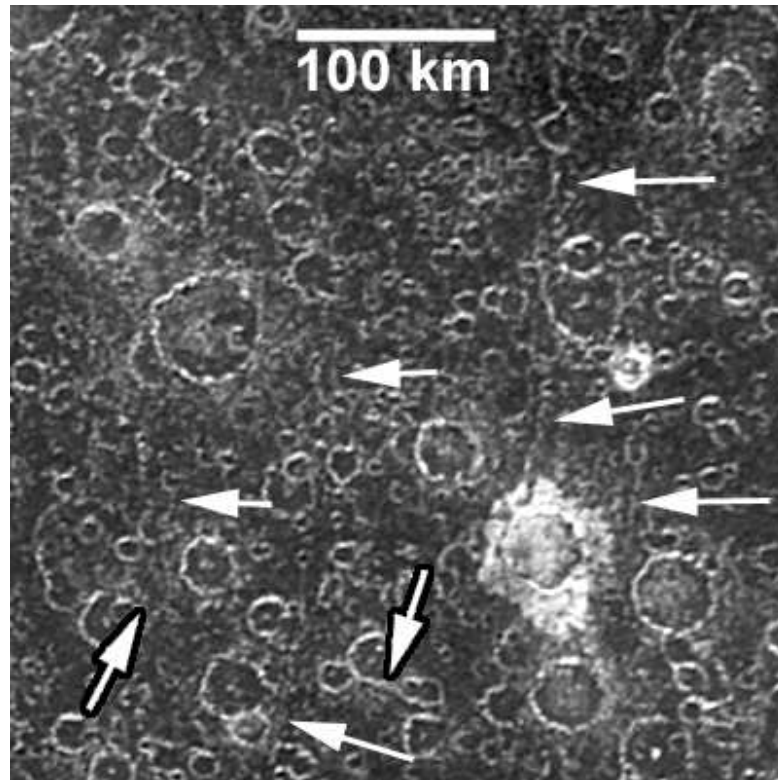


Abbildung 8.52.: Furchen alter abgetragener Ringbecken (Detail der Abb. 8.51). Weiße Pfeile: konzentrische Furchen; weiße Pfeile mit schwarzem Rand: radiale Furchen.

entsprechen - also nur etwa die Hälfte der Mächtigkeit als bei der Entstehung von Asgard oder Valhalla.

8.6.3. Beginn und Dauer der Prä-Asgardischen Periode

Ähnlich den stratigraphisch ältesten Systemen der terrestrischen Planeten ist der Basishorizont des Prä-Asgardischen Systems nicht mehr aufgeschlossen. Die diesem System entsprechende älteste Periode beginnt praktisch mit der Entstehung einer festen Kruste und dauert bis zum Einschlag des Asgard-Impaktors, der den Beginn der nachfolgenden Asgardischen Periode einleitet. Als **prä-Asgardisch** gelten alle Einheiten, deren Krater-Retentionsalter bei den Referenzdurchmessern über dem Retentionsalter des Asgard-Beckens liegen, also höher als $N_{\text{cum}}(D \geq 1 \text{ km}) = 2.29 \cdot 10^{-2}$ sind.

Beispiele kumulativer Verteilungen der Kraterebenen von Callisto zeigt Bild 8.53 (a, b). Im kumulativen Diagramm (a) werden Messungen aus den Zielgebieten G8CSVGRGAP01 (890 m/pxl) und 10CSSMTHPL02 (270 m/pxl) miteinander verglichen. An beide Verteilungen lässt sich eine mittlere Kurve anfitzen, die etwas höher als die Kurve des Asgard-Events liegt. Diese Kurve verläuft auch noch durch die kleineren im Zielgebiet C3CSCATENA01 (39 m/pxl) gemessenen Kraterruinen. Die Produktionsverteilung von Callisto lässt sich im günstigen Fall also bis zu

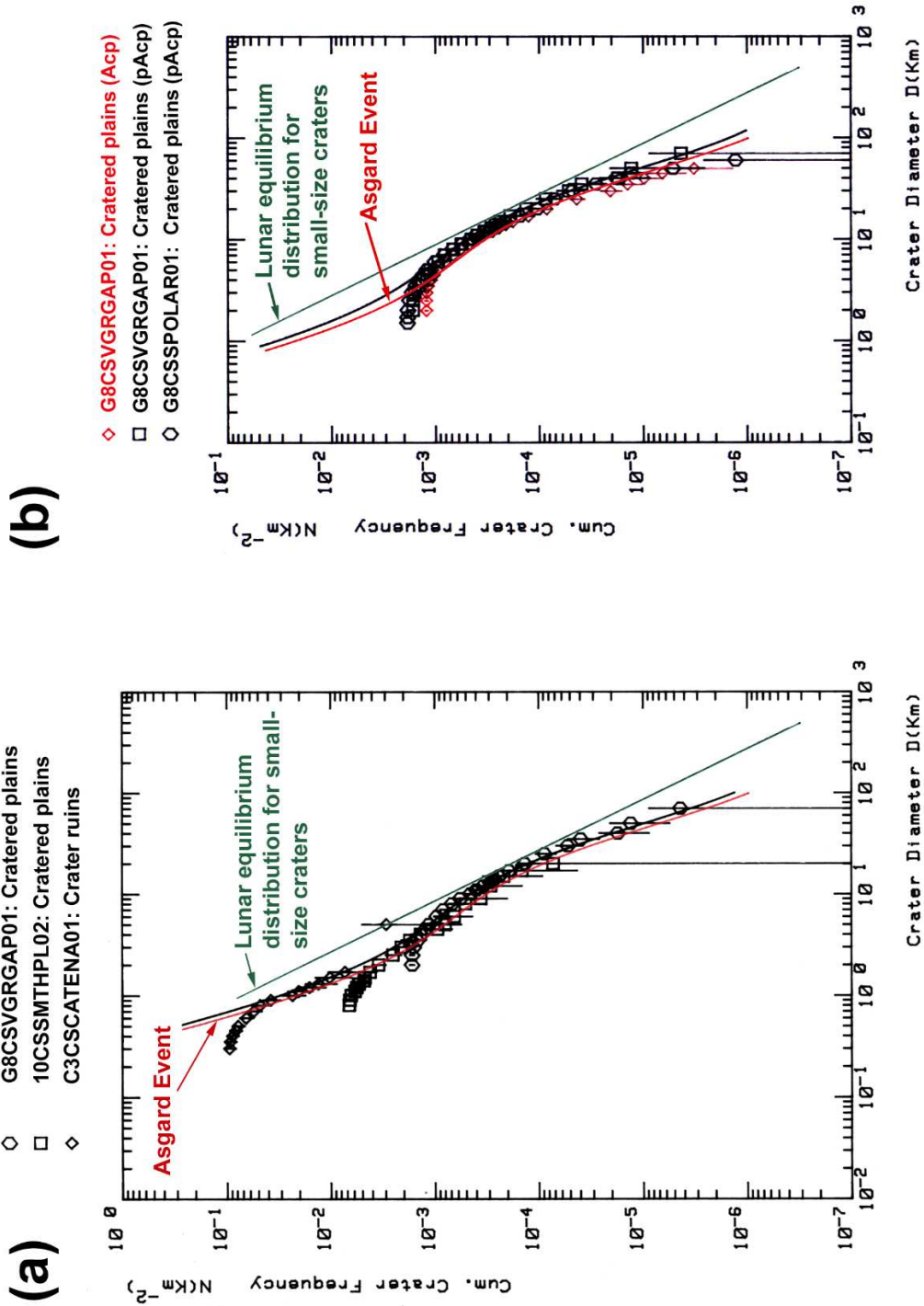


Abbildung 8.53: Kummulative Kraterhäufigkeiten der Kraterebenen Asgardischen (Acp) und prä-Asgardischen Alters (pAcp). Zum Vergleich sind der Asgard-Event (nur Kurve, rot) und die -2-Equilibriumsverteilung mit eingezeichnet. (a) Kraterebenen der Zielgebiete G8CSVGRGAP01 und 10CSSMTHPL02, zusammen mit den "Ruinen" aus dem Zielgebiet C3CSCATENA01; (b) Kraterebenen der Zielgebiete G8CSVGRGAP01 und G8CSSPOLAR01; weitere Erläuterungen im Text.

Region	N_{cum} ($D \geq 1$ km)	Model I [Ga]	Model IIa [Ga]	Model IIb [Ga]
<i>Acp</i>	$2.03 \cdot 10^{-2}$	4.18	4.14 (4.56, 1.74)	4.55 (4.56, 4.1)
<i>pAcp</i> ⁽¹⁾	$3.32 \cdot 10^{-2}$	4.25	4.47 (4.56, 2.48)	4.56 (4.56, 4.44)
<i>pAcp</i> ⁽²⁾	$3.02 \cdot 10^{-2}$	4.23	4.43 (4.56, 2.32)	4.56 (4.56, 4.39)

Tabelle 8.5.: Kumulative Häufigkeiten und Modellalter der Kraterebenen aus unterschiedlichen Regionen. Die Bezeichnungen für die Einheiten der Kraterebenen richten sich nach ihrer Zuordnung zum Asgardischen (*Acp*) oder zum Prä-Asgardischen System (*pAcp*). Einheit *Acp* wurde in Daten des Zielgebiets G8CSVGRGAP01 (980 m/pxl) gemessen, ebenso *pAcp*⁽¹⁾. Die Messung der Einheit *pAcp*⁽²⁾ erfolgte im Zielgebiet G8CSSPOLAR01 (670 m/pxl).

einem Kraterdurchmesser von etwa 700 bis 800 m verfolgen - vorausgesetzt, es handelt sich bei diesen abgetragenen kleinen Kratern nicht um Sekundärkrater.

Das Diagramm in 8.53 (a) verdeutlicht ferner, dass die Verteilungen in den Kraterebenen nicht nur unterhalb der für kleine Krater der lunaren Maregebiete abgeleiteten Gleichgewichtsverteilung liegen (vergl. *Neukum*, 1983), sondern deutlich von der Form dieser Geraden mit der Steigung -2 abweichen. Es handelt sich hier also eindeutig um Produktionsverteilungen. Im Durchmesserbereich oberhalb von ≈ 1 km sind viele auf Callisto gemessene Verteilungen demnach nicht im Gleichgewicht und daher zu Altersdatierungen verwendbar. Dieses Resultat steht im Widerspruch zu Überlegungen von *Zahnle et al.* (1998, 2003), die für ihre Chronologiemodelle (*Model IIa/IIb*) auf Callisto von einer generell mehr als 4 Milliarden Jahre alten und mit Kratern "gesättigten" Oberfläche ausgehen.

Die Unterschiede in den Kraterhäufigkeiten zwischen den helleren und dunkleren Varietäten der Kraterebenen sind meist gering. Ein Beispiel hierfür zeigt das kumulative Diagramm in Bild 8.53 (b). Die Verteilungen in den hellen und dunklen Varianten können innerhalb des Messfehlers auch weitgehend identisch sein, wie einige Messungen belegen. Generell lässt sich festhalten, dass die Kraterhäufigkeiten in den Kraterebenen in der Regel um einen Faktor 2 - 3 um die im Asgard-Becken gemessenen Häufigkeiten schwanken.

Die höchsten aus den Kraterhäufigkeiten abgeleiteten Modellalter der Kraterebenen liegen bei **4.3 - 4.35 Ga** (*Model I*), bzw. noch höher (**4.45 Ga**) in *Model IIa*⁷⁴. Vereinzelt wurden Häufigkeiten gemessen, die zwischen denen Asgards und Valhallas liegen. Die untere Grenze der in den Kraterebenen bestimmten Altern liegt in *Model I* bei etwa 4.1 - 4.15 Ga. Die Ergebnisse einzelner Messungen zeigen die in Tabelle 8.5 aufgelisteten Werte.

Ausgenommen von einigen immer noch nicht zufrieden stellend abgedeckten Gebieten, etwa zwischen den Becken Valhalla und Asgard und südlich von Asgard, ist die Bildabdeckung der Kraterebenen von Callisto zumindest im Auflösungsbereich von 2 - 3 km/pxl nahezu vollständig. Dies ermöglicht, nach Unterschieden in den Kraterhäufigkeiten in Relation zum Winkelabstand zum Apex-Punkt der Bahnbewegung zu suchen und der wichtigen Frage nach entweder heliozentrischer oder planetozentrischer Projektilfamilie nachzugehen. Im weiter unten folgenden

⁷⁴Für *Model IIb* ergaben sich durchweg Alter von 4.56 Ga.

Abschnitt 8.6.5 werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen vorgestellt.

8.6.4. Typlokalitäten geologischer Einheiten des Prä-Asgardischen Systems in regionalem Maßstab

Die im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Varianten der Kraterebenen sind mit Einschlagskraterhäufigkeiten in der Regel gut datierbar und entweder ins Asgardische oder Prä-Asgardische System eingruppierbar. In diesem Abschnitt werden die noch verbleibenden ältesten bei regionalem Maßstab kartierbaren geologischen Einheiten beschrieben. Neben weitgehend abgetragenen Impaktstrukturen handelt es sich dabei um aufgrund nicht ausreichender Bildauflösung und/oder -qualität nicht weiter differenzierbare Varianten der Kraterebenen.

Bild 8.54 zeigt diese ältesten geologischen Einheiten und Strukturen der Callisto-Oberfläche. Die ältesten Krater weisen starke Abtragungerscheinungen auf. Sie werden zur Einheit **ApAc - material of heavily degraded craters** zusammengefasst und entsprechen der lithostratigraphischen Gruppe c_1 . Abb. 8.54 zeigt zwei Beispiele dieses Typs. Der etwa 35 km große (unbenannte) Krater im linken Panel liegt bei etwa 69° Süd und 69° West im Zielgebiet G8CSSPOLAR01 (670 m/pxl). Ejekta sind nicht mehr vorhanden bzw. durch jüngere Ablagerungen überdeckt. Der Kraterrand ist stark abgetragen bzw. auf einzelne Massive reduziert (z. B. im südöstlichen Sektor). Etwa im Zentrum könnte aber noch der Rest eines Zentralberges vorhanden sein. Bemerkenswert ist die niedrige Häufigkeit auf dem Boden des Kraters und in seiner Umgebung, die seinem vermutlich hohen Alter entgegengesetzt ist und zeigt, dass es nach der Entstehung des Kraters zu weiteren geologischen Aktivitäten in Zusammenhang mit der Entstehung des dunklen Materials gekommen ist.

Eine noch weiter fortgeschrittene Stufe der Abtragung zeigen einige der Krater im rechten Panel der Einheit *ApAc* in Abb. 8.54 (Bildzentrum etwa bei 73° Süd, 56° West) Hier sind nur noch Reste der Kraterränder in Form einzelner, ringförmig angeordneter Massive vorhanden. Pfeile zeigen auf die Ränder dieser als Kraterruinen (*crater ruins*, **cr** in Abb. 8.54) bezeichneten Formen. Beim mit ca. 55 km größten der drei Krater sind noch die Reste des Randes einer Zentralmulde vorhanden. Im nordöstlichen Sektor grenzen hellere Ejekta eines jüngeren Kraters der Einheit *VAc* an den abgetragenen Kraterrand.

Weitere Beispiele solcher Kraterruinen, auch bei wesentlich kleineren Durchmessern in höherer Bildauflösung, sind bereits in früheren Abschnitten gezeigt worden. Hier sei insbesondere auf die Abbildungen 8.34 bis 8.38 in Abschnitt 8.5.2 verwiesen.

Die am stärksten abgetragenen Dom-Krater und Penepalimpseste werden in der Einheit **ApAd - material of heavily degraded dome craters** zusammengefasst. Zwei Typlokalitäten zeigt Abb. 8.54. Die links dargestellte Struktur, der Dom-Krater *Nakki*, weist noch Reste des Zentralmuldenrandes und den Dom im Zentrum (Lage bei 56° Süd, 69° West). Boden und helle Ejekta sind bereits weitgehend durch dunkles Material überdeckt. Nördlich des Dom-Kraters *Nakki* befinden sich Reste einer alten Ringstruktur (Ringbögen angezeigt durch kleine Pfeile).

Die im rechten Panel gezeigte Struktur repräsentiert die Ruine eines ehemaligen Dom-Kraters.

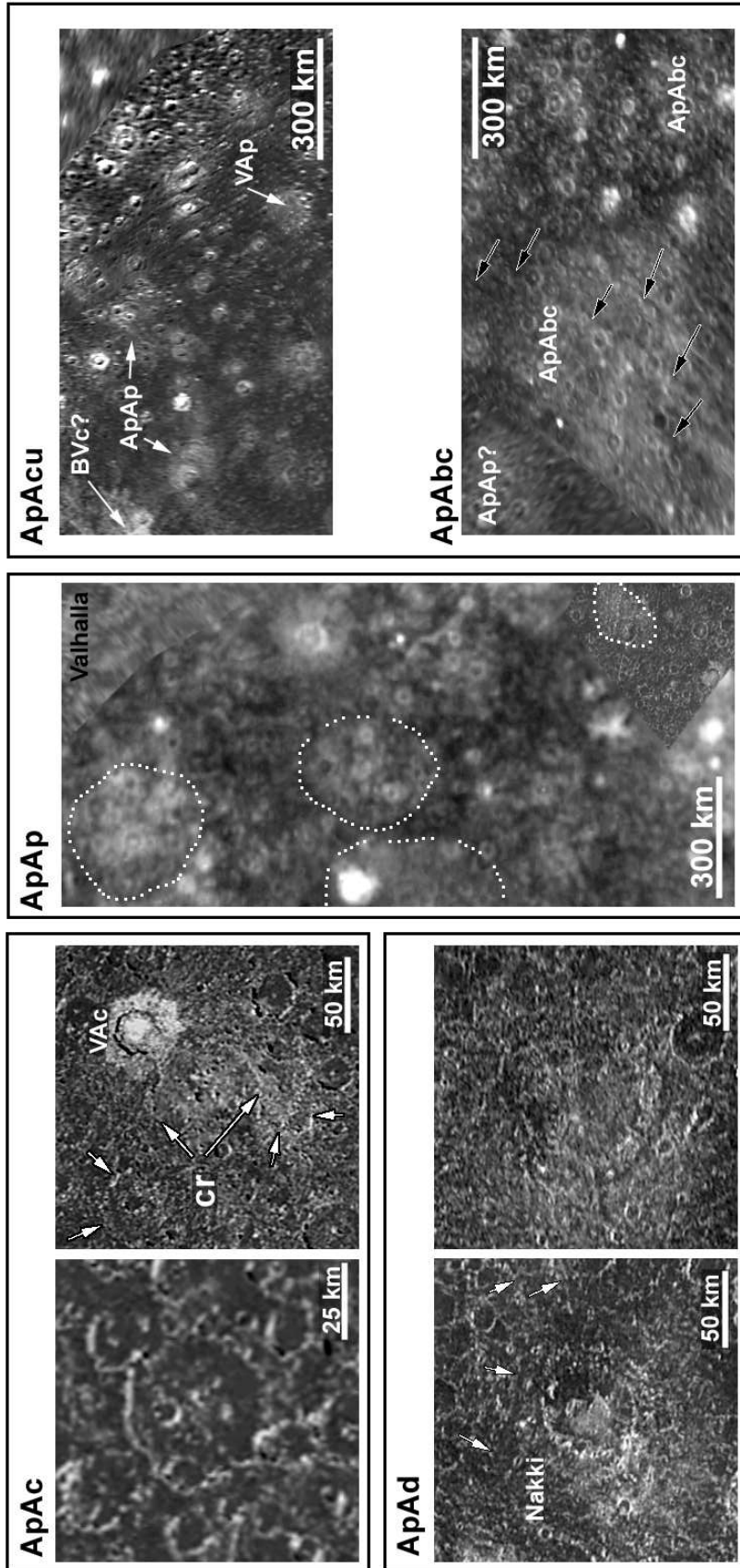


Abbildung 8.54: Typlokalitäten geologischer Einheiten des Prä-Asgardischen Systems in regionalem Maßstab. **ApAc:** Zielgebiet G8CSSPOLAR01 (670 m/pxl), Bildnummern G8C0021 (links) und G8C0024 (rechts); **ApAd:** Zielgebiet G8CSVGRGAP01 (980 m/pxl), Bildnummern G8C0012 (links) und G8C0006 (rechts); **ApAp:** Zielgebiet G7CSGLOBAL01 (6.4 km/pxl), Bildnummer G7C0001.

Reste des Randes der Zentralmulde und des Kraterrandes sind hier noch teilweise erkennbar. Diese Impaktstruktur liegt etwa bei 42° Süd und 54° West und befindet sich wie Nakki im Zielgebiet G8CSVGRGAP01 (980 m/pxl). Eine verlässliche Datierung mittels der überlagernden Krater gelang bei dieser Struktur trotz der gleichen Bildauflösung wie beim Dom-Krater Jalkr (Einheit *VAd*) hier nicht.

In regionalem Maßstab fallen in den Kraterebenen zahlreiche helle Flecken mit polygonalem, teilweise aber auch kreisförmigen Umriss auf. Ihre räumlichen Ausdehnungen betragen mehrere Zehner- bis Hundertkilometer. Gelegentlich festzustellende Ringbögen deuten darauf hin, dass es sich hier mit Sicherheit um alte Impaktstrukturen handelt, die den Palimpsesten im alten dunklen Gelände von Ganymed vergleichbar sind. Eine ähnliche Anzahl Palimpseste wie auf Ganymed wurde vielfach angezweifelt (*Passey und Shoemaker, 1982; Schenk et al., 2004*). Es zeigt sich aber, dass sie in den ältesten Kraterebenen in durchaus signifikanter Anzahl vorhanden und nicht nur gelegentlich auftretende Phänomene sind. Besonders in Bilddaten, die unter relativ hohem Sonnenstand aufgenommen wurden, sind sie gut zu erkennen. Das mittlere Panel in Bild 8.54 zeigt Beispiele alter, abgetragener Palimpseste der Einheit **ApAp - material of heavily degraded palimpsests**. Die Aufnahme stellt einen Ausschnitt des Zielgebiets G7CSGLOBAL01 (6.4 km/pxl) südöstlich von Valhalla (Bildzentrum etwa bei 8° Süd, 88° West), in der auch noch ein kleiner Ausschnitt des Zielgebiets G8CSVGRGAP01 in der rechten unteren Bildecke erfasst ist. Teilweise sind die kreisförmigen Strukturen hier noch erkennen.

In den Gebieten außerhalb der mit *RM-1* bis *RM-5* bezeichneten Gebiete in Abb. 8.1 (Abschnitt 8.1) wurden die Kraterebenen nicht weiter unterteilt. Ebenso wurde ihre Kraterverteilung nicht gemessen. Es handelt sich ausschließlich um Gebiete, von denen nur Voyager-Bildabdeckung nicht ausreichender Qualität existiert. Die Kraterebenen wurden hier zu einer Einheit **ApAcu - material of cratered plains, undivided** zusammengefasst. Ein Beispiel aus den hohen nördlichen Breiten der Jupiter zugewandten Hemisphäre ist in Bild 8.54, einer Region gelegen etwa bei 65° Nord und 345° West, dargestellt. Die Voyager-Bilddaten sind leicht verschmiert. Erkennbar sind aber neben den hier mehr oder weniger einheitlich dunklen Kraterebenen mehrere Palimpseste der Einheiten *ApAp* und *VAp*.

Schenk (1995) identifizierte in den hohen, vorwiegend südlichen Breiten von Callisto eine weitere, relativ helle Variante der Kraterebenen. Diese wurde hier als Einheit **ApAbc - material of bright cratered plains** übernommen. Ein Beispiel von etwa 42° Süd und 320° West zeigt das Panel ganz rechts unten in Abb. 8.54. Der teilweise kreis- bis polygonförmige Umriss dieser Einheiten deutet aber eher auf Palimpseste hin. Außerdem kommt diese Variante der Kraterebenen vorwiegend in der Umgebung der beiden Impaktstrukturen Lofn und Heimdall vor, daher ist eher zu vermuten, dass die hellen Ejekta dieser beiden Becken für die höhere Albedo der Kraterebenen und der in ihnen enthaltenen Palimpseste verantwortlich sind.

Bei den hier beschriebenen Einheiten wurden Kraterhäufigkeitsmessungen nicht durchgeführt bzw. waren nicht möglich. Die Zuordnung zu chronostratigraphischen Einheiten Asgardisch-/prä-Asgardischen Alters (*ApA-*) beruht auf folgenden Überlegungen: Viele der stark abgetragenen Krater und Krateruinen, Dom-Krater und Palimpseste werden von Asgard überdeckt oder von dessen Grabenstrukturen abgeschnitten, sind somit sicher älter als Asgard. Bei einigen stark abgetragenen Palimpsesten ergab sich durch Kratermessung dagegen ein Asgardisches

Alter (Beispiel: Abb. 8.44, Abschnitt 8.5.5). Im Fall einiger Krater des Erosionstyps c_1 deutet sich ebenso ein post-Asgardisches Alter an, da sie auf Asgard bzw. auf einer seiner Ringstrukturen liegen (Beispiel: der c_1 -Krater in Abb. 8.34, Abschnitt 8.5.2). Somit sind stark abgetragene Impaktstrukturen ohne genauere Altersdatierung auf stratigraphischer Basis allein zumindest den Einheiten $ApAc$, $ApAd$ und $ApAp$ zuzuordnen. Die beiden hier beschriebenen Varianten der Kraterebenen, $ApAcu$ und $ApAbc$, werden aufgrund der Schwankungsbreite der Kraterhäufigkeiten um die Häufigkeit des Asgard-Beckens aus anderen, detaillierter kartierten Bereichen der Kraterebenen ebenfalls wenigstens als Asgardisch-/prä-Asgardisch eingestuft.

Die folgenden Abschnitte gliedern sich thematisch wie folgt auf: Im nachfolgenden Abschnitt 8.6.5 wird diskutiert, ob es Unterschiede in den Kraterhäufigkeiten zwischen der in Bahn-Bewegungsrichtung (Apexpunkt) gelegenen Callisto-Hemisphäre und der der Bahnbewegung abgewandten (Antapex) gibt. Die beiden darauf folgenden Abschnitte 8.6.6 und 8.6.7 sind den großen Impaktstrukturen im Detail sowie ihrer räumlichen Verbreitung und Größen-Häufigkeitsverteilung gewidmet. Die Abschnitte 8.6.8.1 bis 8.6.9.2 zeigen die Kraterebenen bei zunehmend höherer Bildauflösung, wobei ebenso zunehmend jüngere geologische Prozesse erfasst werden. Eine bemerkenswerte Farbdichotomie, die nur die Voyager-Daten wiedergeben, wird in Abschnitt 8.6.10 diskutiert. Der vorletzte Abschnitt 8.6.11 dieses Kapitels konzentriert sich auf das bisher wenig untersuchte und beschriebene Thema der frühen Tektonik von Callisto. Der letzte Abschnitt 8.6.12 fasst die geologischen Prozesse dieser frühesten Periode zusammen.

8.6.5. Kraterhäufigkeiten in Abhängigkeit des Winkelabstands zum Apex-Punkt

Schlagen auf den Oberflächen der Galileischen Satelliten, wie in *Model IIa/b* gefordert, vorwiegend Kometen der Jupiter-Familie (JFCs) ein, müssten wegen unterschiedlicher Impaktraten zwischen der in Richtung der Bahnbewegung gelegenen und der dieser Richtung abgewandten Hemisphäre bei gleich alten geologischen Einheiten unterschiedliche Kraterhäufigkeiten zu beobachten sein (vergl. Abschnitt 7.4.5.4). Falls diese Unterschiede in der Kraterhäufigkeit zwischen Apex und Antapex wirklich vorhanden sind, lässt sich dafür unter folgenden Voraussetzungen ein Nachweis erbringen:

1. Die gemessenen Kraterverteilungen müssen Produktionsverteilungen sein, um Alter bestimmen zu können.
2. Die Geologie des untersuchten Körpers sollte über die gesamte Oberfläche möglichst "einfach" sein, d. h. umfassende Überprägungsprozesse sollten nicht oder nur in geringem Umfang abgelaufen sein.

Callisto erfüllt beide Voraussetzungen. Beim inneren Nachbarn Ganymed dagegen haben durch intensive Tektonik bereits große Veränderungen stattgefunden. Die durch die SSI-Kamera weitgehend vervollständigte globale Bildabdeckung von Callisto bildet eine ausreichende Datenbasis zur Erweiterung bereits früherer auf Voyager-Daten basierender Messungen, die - teilweise auch wegen der großen Unterschiede in der Bildqualität - nur in einem eingeschränkten Winkelbereich durchgeführt werden konnten (vergl. *Wagner und Neukum, 1994a*).

Mögliche Schwankungen in den Häufigkeitsverteilung der Kraterebenen in Abhängigkeit des Abstandes zum Apex- und Antapex-Punkt wurden mit folgender Methode genauer untersucht:

1. In die Bildmosaikern, in denen im regionalen Maßstab (ca. 0.7 - 2 km/pxl) gemessen wurde und die sich über mehrere Breiten- und Längengrade erstrecken, wurden geographische Netzlinien eingezeichnet, meist in Abständen von höchstens 5 - 10 Breiten- und Längengraden⁷⁵.
2. Für jede dieser Messzellen wurde der Winkelabstand zum Apex- oder Antapex-Punkt berechnet und in ein Raster von 5° Spannweite eingruppiert. Der Winkelabstand wurde aus den geographischen Längen und Breiten der Messzelle und des Apex- oder Antapex-Punktes aus dem Seitenkosinussatz für Euler'sche Dreiecke auf einer Kugeloberfläche wie folgt ermittelt:

$$\cos(c) = \cos(a) \cdot \cos(b) + \sin(a) \cdot \sin(b) \cdot \cos(\gamma). \quad (8.1)$$

Die Seiten a , b und c entsprechen Abschnitten von Großkreisen auf einer Kugel (in Radian). Die Seite a ergibt sich direkt aus der geographischen Breite ϕ der Messzelle durch den Ausdruck $a = \text{abs}(\phi)$. Die Seite b berechnet sich aus der geographischen Länge λ der Messzelle durch den Ausdruck $b = \text{abs}(\lambda - \lambda_0)$ ($\lambda_0 = 90^\circ$ für den Apex-Punkt bzw. $\lambda_0 = 270^\circ$ für den Antapex). Der Winkel γ ist hier stets $\pi/2$. Die Seite c entspricht dem gesuchten Winkelabstand zwischen a und b .

3. Die Häufigkeiten in den Messzellen gleichen Raster-Winkelabstandes wurden aufsummiert und ihre Häufigkeiten (bzw. ihre Modellalter) mit Angabe des oberen und unteren Fehlers durch Anfitzen der Callisto-Produktionsverteilung bestimmt.

Für die beiden Hauptvarianten der Kraterebenen (Acp und $ApAcp$) aus unterschiedlichen Regionen wurden die Häufigkeiten mit ihren Fehlern gegen den Winkelabstand zum Apex geplottet. Das Ergebnis ist in Abbildung 8.55 dargestellt. Im oberen Diagramm Abb. 8.55 (a) wurde das Produktionsverteilungspolynom angefitzt und die kumulative Häufigkeit N ($D \geq 10$ km) geplottet, da die Retentionsalter auf den niedriger aufgelösten Voyager-Daten nur bis herab zu einem Durchmesser von höchstens 8 km verlässlich gemessen werden konnten.

Die weiteren Diagramme Abb. 8.55 (b - e) zeigen die direkt gemessenen kumulativen Häufigkeiten für die Durchmesser 10 km, 20 km, 30 km und 50 km mit ihren Fehlern. Diagramm Abb. 8.55 (f) basiert auf Messungen aus dem SSI-Zielgebiet G2CSVGRGAP01. Ist in einer spezifischen Messung kein Datenpunkt für diesen Durchmesser (D_i) vorhanden, wurde die kumulative Häufigkeit aus den Häufigkeiten des nächst-kleineren (D_{i+1}) und -größeren Durchmessers (D_{i-1}) unter Verwendung der Steigung der Verteilung zwischen den beiden benachbarten Durchmessern nach der in Abschnitt 7.4.7 beschriebenen Methode linear interpoliert.

Beide Varianten der Kraterebenen zeigen keinerlei signifikante Änderungen der Häufigkeit mit dem Abstand zum Apex. Daraus sind folgende Schlüsse zu ziehen:

⁷⁵Dies war wegen der zu berücksichtigenden Maßstabsänderungen mit der Breite ohnehin erforderlich.

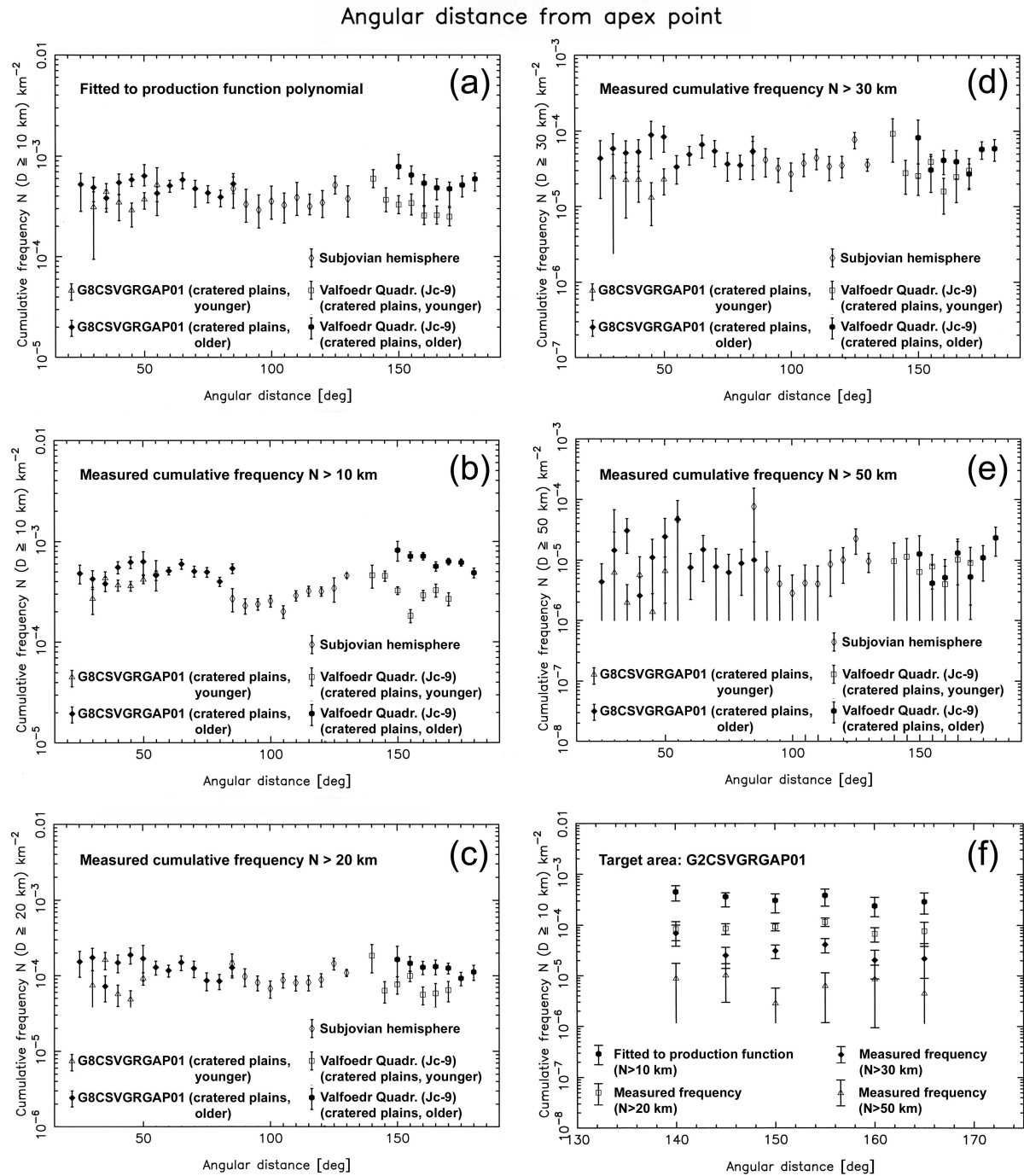


Abbildung 8.55.: Krater-Retentionsalter der Kraterebenen aufgetragen gegen den Winkelabstand zum Apex-Punkt der Bahnbewegung. Die offenen Symbole entsprechen Messpunkten der Einheit *Apc*, die geschlossenen der Einheit *ApAcp*. (a) Krater-Retentionsalter durch Anfitzen des Produktionsverteilungspolynoms für N ($D \geq 10$ km). Die weiteren Diagramme zeigen die direkt gemessenen kumulativen Häufigkeiten für (b) $D = 10$ km, (c) $D = 20$ km, (d) $D = 30$ km und (e) $D = 50$ km. (f) SSI-Zielgebiet G2CSVGRGAP01.

1. Die Impaktrate war gegenüber der geographischen Position **isotrop**, d. h. die Projektile kamen im Durchschnitt gleichverteilt aus allen Richtungen. Dieses Szenario erfordert eine **vorwiegend planetozentrische Projektilpopulation**, wie von *Horedt und Neukum* (1984a,b) diskutiert. Da eine planetozentrische Projektilpopulation nicht stabil ist - die durchschnittliche Lebensdauer dieser Projektile liegt bei 10^4 Jahre (ebd.) - müssen die Projektile immer wieder nachgeliefert werden. Wahrscheinlichstes Szenario ist deshalb das stetige Einfangen von Asteroiden (und/oder Kometen) durch Jupiter (ebd.).
2. Die zweite Möglichkeit ist eine **nicht-synchrone Rotation** von Callisto, zumindest in der Zeit, in der sich die Kraterebenen gebildet haben, durch die die Effekte einer höheren Einschlagsrate am Apex ausgeglichen würden (*Zahnle et al.*, 1998, 2003). Synchrone Rotation stellt sich der Theorie nach bereits sehr kurze Zeit nach der Entstehung eines Satelliten ein und ist deshalb geologisch mit Sicherheit nicht mehr überliefert (*Squyres und Croft*, 1986). Zumindest bei Europa glaubte man, eine nicht-synchrone Rotation der äußeren Eiskruste über dem Ozean durch bestimmte Lineamentmuster mit einer wahrscheinlichen Periode zwischen 12,000 und 250,000 Jahren nachgewiesen zu haben (*Geissler et al.*, 1998; *Hoppa et al.*, 2001).

Da Callisto vermutlich ebenfalls einen derartigen Ozean besitzt (*Khurana et al.*, 1998), könnte man auch hier eine sehr langsame asynchrone Rotation von Callisto vermuten, die unter Umständen auch rezent noch anhält und, wie bei Europa, durch Gezeitenkräfte angetrieben wird. Diese Kräfte sind bei Callisto jedoch sehr gering. Der Satellit befindet sich nicht in einer Resonanz mit den Nachbarmonden. Die Gezeitenkräfte durch Jupiter allein könnten jedoch ausgereicht haben, um die Lithosphäre über dem vermuteten Ozean geringfügig langsamer als das Innere rotieren zu lassen, aber immer noch schnell genug, um den Einfluss einer heliozentrischen Projektilverteilung auszugleichen. Bereits ein Unterschied von wenigen Millionen Jahren in der Rotationsdauer ist ausreichend, da durch Krater-Häufigkeitsmessungen nur Altersunterschiede von mindestens 30 Millionen Jahren auflösbar sind⁷⁶.

Ein weiteres Indiz für eine planetozentrische Projektilverteilung ergibt sich aus der Krater-skalierung. Wie das relative Diagramm in Bild 7.4 (Abschnitt 7.4.4.2) zeigt, sind die Verteilungen von Callisto wie von Ganymed gegenüber der lunaren Verteilung nach links zu kleineren Durchmessern verschoben. Daraus ist eine im Mittel niedrigere Einschlagsgeschwindigkeit abzuleiten. Dies wiederum deutet nach Überlegungen von *Horedt und Neukum* (1984b) eher auf vorwiegend planetozentrische Projektile hin. Die mittleren Impaktgeschwindigkeiten heliozentrischer Projektile liegen bei Ganymed und Callisto etwa bei 15 bis 20 km/sec, bei planetozentrischen dagegen bei nur 5 bis 6 km/sec (ebd.). Rein empirisch folgt somit aus der Lage der relativen Verteilungsmaxima eine durchweg niedrigere mittlere Geschwindigkeit bei diesen beiden Satelliten.

Ein letzter Hinweis auf eine isotrope Einschlagsrate folgt schließlich aus der Stabilität der Produktionsverteilung von Callisto unabhängig von der geographischen Position. Bei asymmetrischen Kraterhäufigkeiten in Bezug auf den Apex-Punkt wäre dort nicht nur die Einschlagsrate

⁷⁶Dies gilt unter der Annahme von *Model I* für Gebiete älter als ca. 3.5 Ga.

höher als am Antapex-Punkt (ein Faktor 10 nach z. B. *Shoemaker und Wolfe* (1982)), sondern die Einschlagsgeschwindigkeiten wären auch höher im Vergleich zum Antapex (*Horedt und Neukum*, 1984a). Daraus würde sich eine variable Produktionsverteilung ergeben: Die Verschiebung des lunaren Polynoms in $\log D$ zur Herleitung des Callisto-Verteilungspolynoms müsste, abhängig vom Winkelabstand zum Apex, im Sinne unterschiedlicher Einschlagsgeschwindigkeiten jeweils unterschiedlich weit erfolgen. Dies ist jedoch nicht der Fall.

8.6.6. Die Ringbecken Adlinda und Vanaheim

Neben den Becken Valhalla und Asgard wurde die SSI-Kamera auf zwei kleinere Becken mit nur wenigen hundert Kilometern Durchmesser ausgerichtet. Beide waren bereits in den Voyager-Daten zu identifizieren, sind aber stark abgetragen und wurden als sehr alte Impaktstrukturen interpretiert (*Passey und Shoemaker*, 1982).

Die nach erster Durchsicht des SSI-Zielgebiets G8CSADLNDA01 **Adlinda** (neu) benannte Multiringstruktur liegt nordwestlich von Lofn⁷⁷ mit Zentrum etwa bei 47° südlicher Breite und 34° westlicher Länge. Die SSI-Kamera erfasste Adlinda bis auf eine Datenlücke vollständig, wie das Übersichtsbild 8.56 zeigt. Drei Regionen innerhalb Adlindas sind im Detail herausvergrößert dargestellt (mit 1 - 3 bezeichnete einbeschriebene Rechtecke). Der Durchmesser der Struktur beträgt ungefähr 800 km, gemessen am äußersten noch beobachtbaren Ring (grob gestrichelt eingezeichnet in Abb. 8.56).

Adlinda wird zu einem großen Teil durch die kontinuierlichen Ejekta des Lofn-Beckens (**Lo**) und dessen Sekundärkrater (**Vlos**) überdeckt. Am Nordwest-Rand wird Adlinda durch den c_3 -Krater Buri (**Bu**) überlagert. Die Ringstruktur selbst ist durch konzentrische Furchen gekennzeichnet. Lediglich die äußersten davon sind gut zu erkennen. Ihre durchschnittliche Breite beträgt 5 - 10 km, ungefähr einen Faktor zwei geringer als die Breite der Valhalla- oder Asgard-Gräben. Schwieriger zu bestimmen ist wegen der fortgeschrittenen Abtragung der durchschnittliche Abstand zwischen den einzelnen Gräben. Der unterste Wert ist hier bei etwa 20 - 30 km anzusetzen und liegt damit ebenfalls etwa einen Faktor zwei unter den entsprechenden Werten von Valhalla und Asgard. *Homan et al.* (1998) führen eine Spannweite von einigen Zehnerkilometern bis etwa 100 km für die Abstände der einzelnen Furchen und Gräben auf.

Adlinda wurde wegen seiner stark abgetragenen Furchen im Vergleich mit Valhalla und Asgard als das älteste dieser drei Becken interpretiert (*Klemaszewski und Greeley*, 2000). Dagegen lassen sich zumindest zwei Einwände erheben. Die Kraterhäufigkeit innerhalb Adlinda ist im Vergleich mit den umgebenden Kraterebenen niedriger. Allerdings bewirken Unterschiede in der Beleuchtungsgeometrie zwischen den Aufnahmen der Zielgebiete G8CSADLNDA01 und G8CSVGRGAP01 einen Kontrastunterschied, der eine geringere "Schärfe" bei ersterem Zielgebiet hervorruft. Die geringere visuelle wie messbare Kraterhäufigkeit könnte also unter Umständen dadurch bedingt sein. Die Grenze zwischen beiden Zielgebieten verläuft in Bild 8.56 entlang der Datenlücke durch die Krater Buri und Orestheus (Detailbild 1 in Abb. 8.56).

⁷⁷Wie in Abschnitt 8.3.1 erwähnt, bezog sich die Bezeichnung des Zielgebiets G8CSADLNDA01 ursprünglich auf die mittlerweile Lofn genannte Impaktstruktur.

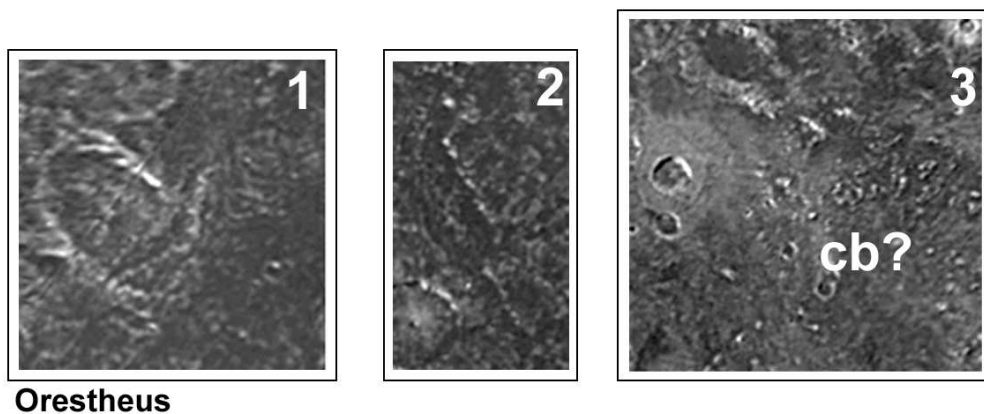
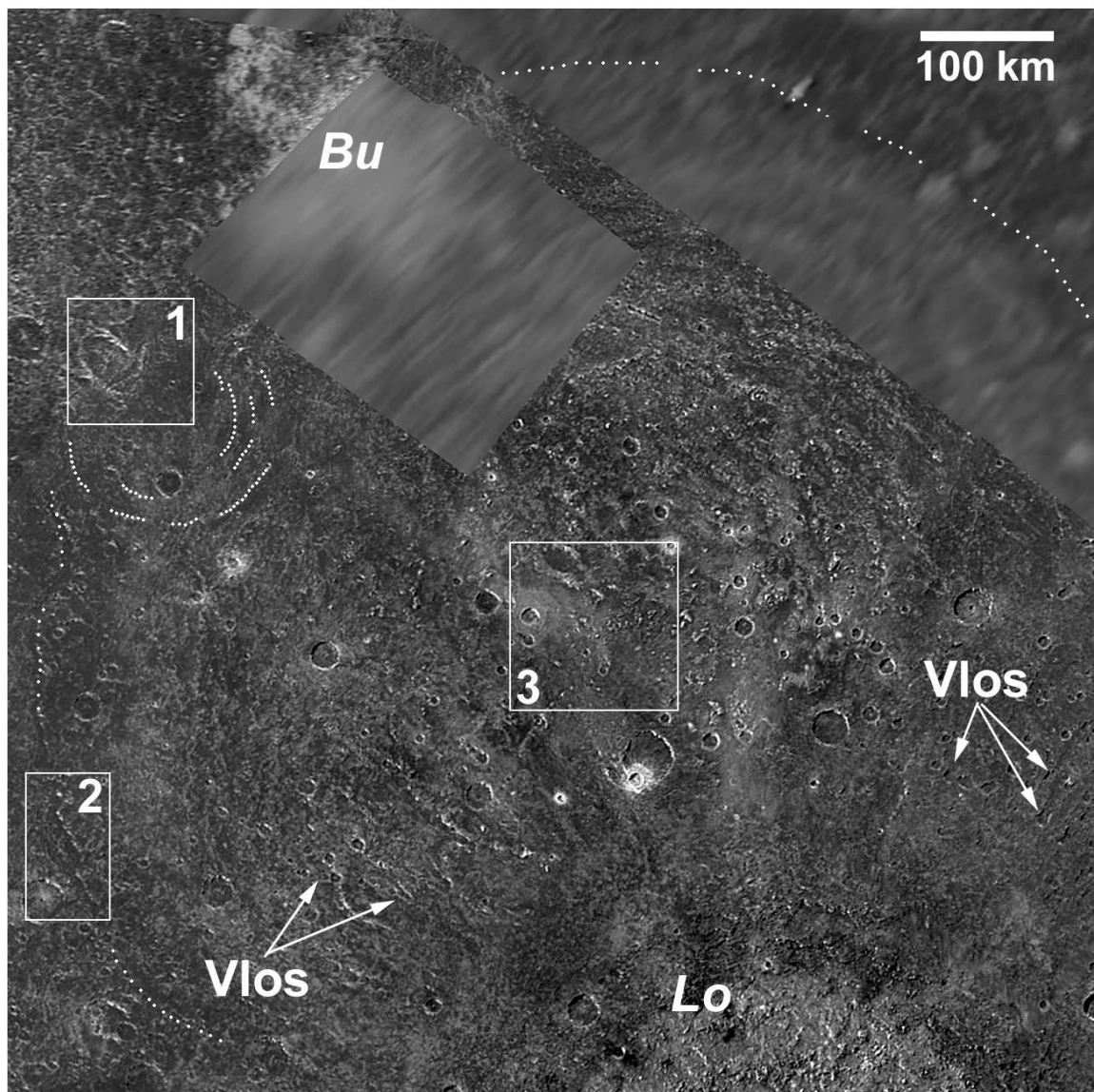


Abbildung 8.56.: Das Multiringbecken Adlinda in den SSI-Daten des Zielgebiets G8CSADLNDA01 in Voyager-Kontext. Die Bildauflösung beträgt etwa 830 m/pxl. Bildnummern der SSI-Daten G8C0029 bis G8C0034. Adlinda wird von Ejekta des Beckens Lofn (**Lo**) und des Kraters Buri (**Bu**) überlagert. Die Pfeile zeigen auf Sekundärkrater Lofns (**Vlos**). Drei Ausschnitte (1 - 3) sind unten herausvergrößert dargestellt.

Einheit	N_{cum} ($D \geq 1$ km)	Model I [Ga]	Model IIa [Ga]	Model IIb [Ga]
<i>Adlinda</i> ⁽¹⁾				
<i>adu</i>	$4.85 \cdot 10^{-3}$	3.96	1.99 (4.3, 0.49)	3.62 (4.52, 1.86)
<i>Vloc</i>	$2.54 \pm 0.6 \cdot 10^{-3}$	3.86 ± 0.04	1.18 (3.54, 0.26)	2.56 (4.18, 1.1)
<i>pAcp</i>	$3.32 \cdot 10^{-2}$	4.25	4.47 (4.56, 2.48)	4.56 (4.56, 4.44)

Tabelle 8.6.: Kumulative Häufigkeiten und Modellalter des Adlinda-Beckens ⁽¹⁾nicht weiter unterteilt: *Adlinda basin material, undivided (adu)*, Umgebung mit Lofn-Ejekta (*Vloc*) und Kraterebenen *pAcp*, gemessen in den G8CSVGRGAP01-Daten).

Die Kraterverteilung innerhalb Adlindas wurde ohne weitere geologische Unterteilung gemessen. Ihre kumulative Verteilung ist in Abbildung 8.57 dargestellt. Die Modellalter im Vergleich Einheiten aus der Umgebung Adlinda's sind in Tabelle 8.6 aufgelistet. Die auf Adlinda gemessenen Krater unterhalb 10 km Durchmesser liegen über der Produktionsverteilungskurve. Vermutlich wurden hier Sekundärkrater Lofns mitgemessen, die nicht eindeutig erkennbar waren. Zum Vergleich sind die Messungen der kontinuierlichen Ejekta Lofn's (Kurve des Lofn-Events in grün) und der prä-Asgardischen Kraterebenen des Zielgebiets G8CSVGRGAP01 mit geplottet, jeweils mit den Kurven. Die Kraterhäufigkeit Adlindas und die zugehörigen Modellalter liegen laut Tabelle 8.6 deutlich unter den der prä-Asgardischen Kraterebenen. Dies kann auf ein tatsächlich jüngeres Alter des Beckens hindeuten, aber auch durch Überprägung mit Lofn-Ejekta bedingt sein.

Die Detailaufnahme des Zentrums Adlindas (rechtes Detailbild 3 unten in Abb. 8.56) umfasst möglicherweise eine als *central bright plains* zu interpretierende Einheit, wie auch bei Valhalla oder Asgard. Die Einheit lässt sich nach außen nicht deutlich abgrenzen, vermutlich wegen der überlagernden Lofn-Ejekta. Massive und Gruppen von Massiven stellen die Reste konzentrischer Rücken dar. *Greeley et al.* (2000b) unterscheiden eine zentrale Einheit in Adlinda (*adc*), erwähnen aber nicht ausdrücklich ein "Palimpsest" wie in Valhalla.

Ein zweiter Hinweis auf ein möglicherweise jüngeres Alter Adlindas ist durch den elliptischen Krater Orestheus gegeben, den das Detailbild links unten zeigt. Der Kraterrand ist relativ gut erhalten und gehört der Klasse c_2 bzw. VAc an. Orestheus wird von einer der Furchen Adlindas durchschnitten und ist somit älter als das Becken. Diese Tatsache, und die durch Messung belegte niedrigere Kraterhäufigkeit als in den Kraterebenen machen deutlich, dass Adlinda gegenüber früheren Ansichten (vergl. *Klemaszewski und Greeley*, 2000) eher ein jüngeres Becken sein könnte, das mindestens in das Asgardische System, unter Umständen (laut Kratermessung) sogar in das Valhallische System eingeordnet werden könnte.

Nimmt man allerdings eine zunehmende Verfestigung der Kruste mit der Zeit an, wodurch die Grenze zwischen sprödem und duktilem Verhalten weiter nach unten wandert (*McKinnon und Melosh*, 1980), müsste Adlinda älter sein als Asgard oder Valhalla, da aus den Grabenbreiten des Beckens von 5 - 10 km auf eine geringere Mächtigkeit der äußeren spröden Schicht zu schließen wäre. Die am besten erkennbare Grabenstruktur lässt sich am Südwestrand Adlindas über gut

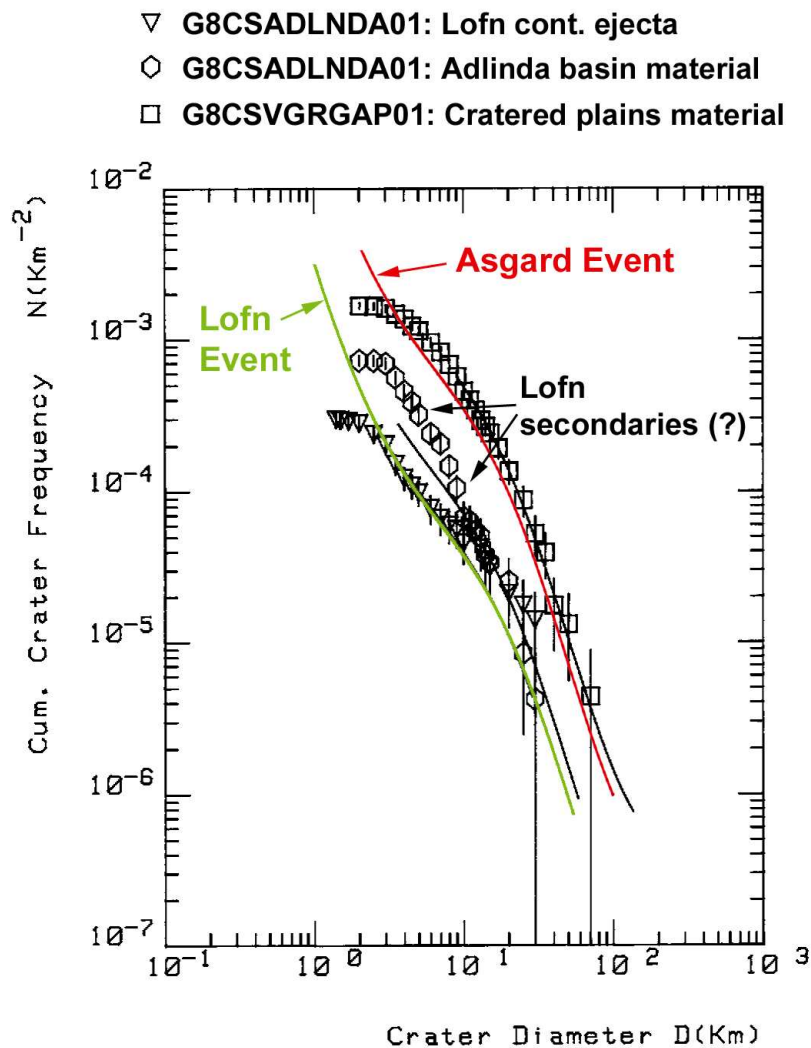


Abbildung 8.57.: Kumulative Häufkeitsverteilung im Adlinda-Becken. Die Verteilung ist mit der der Lofn-Ejekta (untere Verteilung) und der der Kraterebenen im Zielgebiet G8CSVGRGAP01 (obere Verteilung) verglichen. Die über der Produktionsverteilungskurve liegenden Messpunkte sind vermutlich Sekundärkrater des Lofn-Beckens. Die rote Kurve gibt den Asgard-Event an.

500 km verfolgen (Greeley et al., 2000b). Dieser äußerste Graben ist im mittleren Detailbild in Abb. 8.56 (2) herausvergrößert. Er ist mit 12 bis 20 km Breite (Greeley et al., 2000b) allerdings doppelt so breit wie die übrigen und damit den Gräben in Asgard oder Valhalla vergleichbar.

Durch den Adlinda-Impaktevent wurde ein kleineres, prä-existierendes Becken mit etwa 170 km Durchmesser nicht vollständig zerstört. Details dieses Beckens sind, außer konzentrischen Lineamenten, die die Ringstruktur noch andeuten, nicht mehr festzustellen. Dieses kleinere Ringbecken liegt etwa südöstlich des Kraters Orestheus. Es ist in der Übersicht von Abb. 8.56 durch fein gepunktete Signatur angegeben.

Die Bilddaten von Voyager-1 zeigen bei etwa 35° nördlicher Breite und 0° westlicher Länge

nahe des Valhalla-Beckens eine nur durch konzentrische Lineamente erkennbare, etwa 600 km große Ringstruktur (*Passey und Shoemaker, 1982*). Während der zehnten Umkreisung Galileos um Jupiter wurde die SSI-Kamera auf das Becken ausgerichtet und nahm zwei Bilder mit einer Auflösung von 430 m/pxl auf. Das Becken ist derzeit unbenannt, der Name *Vanaheim* zur leichteren Identifizierung wird vorgeschlagen.

Bild 8.58 stellt ein Mosaik des Beckens aus den SSI-Daten im niedriger aufgelösten Kontext von Voyager-1 dar. Einige der bereits in den Voyager-Daten erkennbaren konzentrischen Strukturen sind weiß eingezeichnet. Soweit feststellbar, beträgt der Abstand dieser Ringe voneinander etwa 20 bis 50 km.

Das Becken ist weitgehend durch jüngere Krater und dunkles Material überdeckt. Degradation und Überdeckung der Ringe sind weiter fortgeschritten als bei Adlinda, das Vanaheim-Becken dürfte daher stratigraphisch älter sein. An seinem nordöstlichen Rand sind in den Voyager-Daten weitere konzentrische Strukturen zu identifizieren, die zu einem kleineren Becken mit vermutlich 270 km Durchmesser gehören könnten.

In Bild 8.58 unten ist der durch das einbeschriebene Rechteck angezeigte Ausschnitt herausvergrößert. Die Ringe sind eindeutig Furchen (weiße Pfeile), die aber weitgehend aufgefüllt sind und nicht sehr tief erscheinen. Sie sind meist nur über kürzere Abschnitte von wenigen Zehnerkilometern zu verfolgen und fast durchweg durch Krater und dunkles Material überdeckt. Die ursprüngliche Breite der Furchen und Gräben ist nicht mehr exakt zu bestimmen, anders als teilweise noch bei Adlinda. Sie liegt in der Größenordnung von 10 km. Ringe des benachbarten kleineren Beckens sind ebenfalls in den SSI-Daten nachzuweisen. Furchen sind hier nicht erkennbar, allenfalls gekrümmte Albedolineamente, oder Andeutungen von Rücken (graue Pfeile). Dieses kleinere Becken ist wegen der noch stärkeren Überdeckung stratigraphisch älter als die *Vanaheim*-Ringstruktur.

Das Zentrum des *Vanaheim*-Beckens ist frei von Furchenstrukturen und relativ glatt (**cps** = *smooth cratered plains* in Bild 8.58). Die Albedo unterscheidet sich nicht von den umgebenden dunklen Kratererebenen. Helle, zentrale Ebenen wie beispielsweise in Valhalla sind nicht vorhanden und könnten durch das dunkle Material vollständig überdeckt worden sein. Diese glatte Einheit ist auch nicht annähernd kreisförmig. Dass eine zentrale Einheit mit Resten von "Ringen" in Adlinda noch vorhanden ist, bei diesem Becken jedoch nicht, deutet auf ein relativ höheres Alter.

Die auf Voyager- und SSI-Daten gemessenen Kraterhäufigkeiten ergeben ein deutlich prä-Asgardisches Alter der das Becken überlagernden Kratererebenen, wie Bild 8.59 zeigt. Die Modellalter (*Model I*) schwanken zwischen **4.22 Ga** (Voyager-Kontext) und **4.28 Ga** (SSI-Daten). Die entsprechenden Werte für *Model IIa/IIb* liegen höher als 4.3 Ga. Ein prä-Asgardisches Alter für das *Vanaheim*-Becken ist anzunehmen, da die gemessenen Krater mit einer Ausnahme alle die Furchen überlagern. Lediglich ein Krater (nahe des rechten unteren Pfeils in Abb. 8.58) wird von einer der Furchen durchschnitten und ist älter.

Die in den glatten Ebenen (*cps*) gemessene Verteilung ergab ein etwa Asgardisches Alter. Diese entspricht sicher nicht dem *Vanaheim-Event*, sondern zeigt eher das Ende der Auffüllung des Beckenzentrums mit dem durch Sublimationsverwitterung entstandenen dunklen Rückstand an.

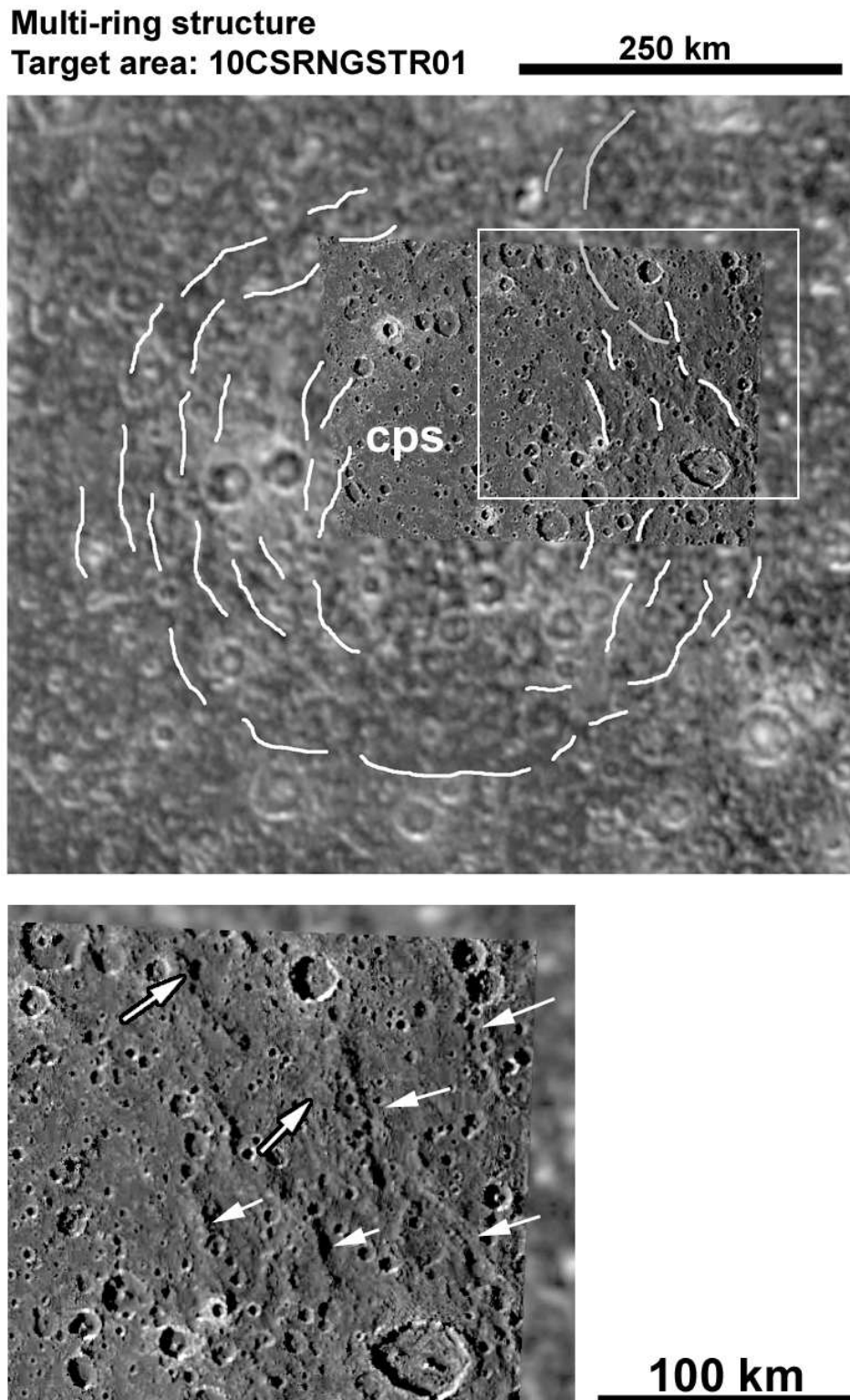


Abbildung 8.58.: Multiringbecken nordöstlich Valhalla (informeller Name: *Vanaheim*) auf SSI-Daten (Bildnummern: 10C0037 und 10C0038) des Zielgebiets 10CSRNGSTR01 in Voyager-1-Kontext. Die Bildauflösung der SSI-Daten beträgt 430 m/pxl, die von Voyager-1 hier etwa 2 km/pxl. Eingezeichnet sind einige der Ringe des Beckens (weiß), sowie Ringe eines vermuteten weiteren, kleineren älteren Beckens (mit weißen, schwarz umrandeten Pfeilen). Der Bereich innerhalb des Rechtecks ist unten vergrößert dargestellt.

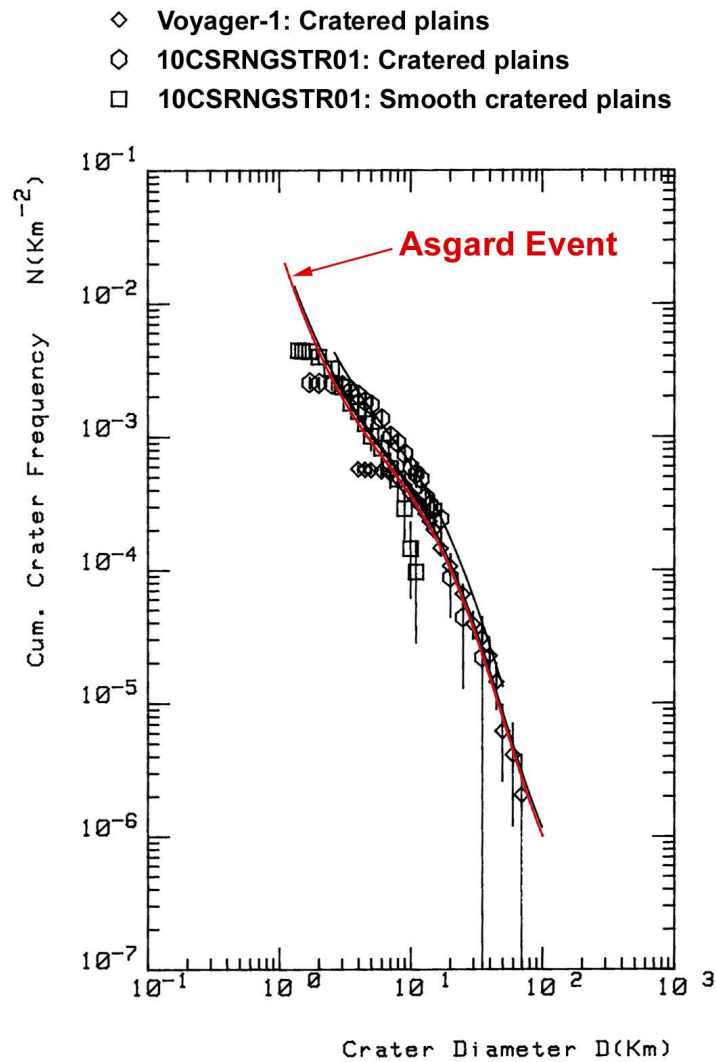


Abbildung 8.59.: Kumulative Häufigkeitsverteilung im Vanaheim-Becken. Kraterebenen und glattes Gebiet innerhalb des Beckens im Vergleich mit den auf Voyager-Daten gemessenen Kraterebenen (Kontext) und dem Asgard-Event (rote Kurve).

8.6.7. Globales Inventar großer Impactstrukturen in den Kraterebenen von Callisto

In diesem Abschnitt wird untersucht, ob die von einigen Autoren (z. B. *Strom et al.*, 1981) vermutete "Verarmung" an großen Kratern - der so genannte *dearth in large craters* (ebd.) - und demzufolge an großen Projektilen im Jupitersystem zutrifft. Nachprüfen lässt sich dies am geeignetsten in Bilddaten regionaler Auflösung (500 m/pxl bis zu 2 km/pxl), da sie große Einschlagsstrukturen entweder vollständig abbilden oder genügend Kontext vorhanden ist, um konzentrische Strukturen als Teil einer größeren Impactstruktur sicher zu identifizieren.

Die nachfolgend diskutierte statistische Erhebung großer Impactstrukturen bleibt lückenhaft:

(1) Nur einmal während der gesamten Galileo-Mission konnte ein größeres zusammenhängendes Gebiet auf Callisto in einer Auflösung zwischen ≈ 700 und 900 m/pxl (in Orbit G8) aufgenommen werden. (2) Der weitaus umfassendere Teil der Callisto-Oberfläche liegt dagegen nur in Voyager-Auflösung von durchschnittlich 2 km/pxl vor (dies gilt in gleicher Weise auch für den Nachbarmond Ganymed). Stark abgetragene Strukturen sind in diesen Daten deutlich schlechter erkennbar. (3) Manche SSI-Daten, die weitere Lücken in der Voyager-Abdeckung schließen sollten, sind teilweise sogar noch geringer als Voyager aufgelöst (4.3 (G2) bzw. 6.4 km/pxl (G7)).

Die folgende Untersuchung konzentriert sich auf die folgenden beiden Klassen großer Einschlagsstrukturen:

1. die hellen, meist kreisrunden, als Palimpseste bezeichneten Flecken (*Passey und Shoemaker, 1982*) und
2. die "eigentlichen" Ringbecken, die durch konzentrische Strukturen (Rücken, Gräben) wie die Becken Asgard und Valhalla gekennzeichnet sind.

Wie in den Abschnitten 8.6.2 und 8.6.4 bereits kurz angesprochen, gibt es mit den einzelnen hellen, teilweise annähernd kreisrunden, teilweise polygonalen Flecken unterschiedlicher Größe in den Kraterebenen schlüssige Hinweise auf eine bisher nicht vermutete größere Anzahl Palimpseste auf Callisto, vergleichbar mit Ganymed, aber in deutlich weiter fortgeschrittenem Abtragungszustand. Kontrast- und Kantenverstärkung der Bilddaten hilft, diese Strukturen besser herauszuheben. Dazu kommen, zusätzlich zu den neun in den Voyager-Daten (eingeschlossen Asgard und Valhalla) erkannten Ringstrukturen (vergl. *Passey und Shoemaker, 1982*) eine relativ große Zahl bisher nicht erkannter Ringbecken. Sie sind lediglich noch in Form schwacher konzentrischer Lineamente, in günstigeren Fällen durch konzentrische Furchensysteme nachweisbar. Letztere sind nur bei genügend hoher Bildauflösung wie bei den SSI-Daten des Orbits G8 (Zielgebiete G8CSVGRGAP01, G8CSADLND01 und G8CSSPOLAR01) zu erkennen (*Klemaszewski et al., 1998a*).

Die Erweiterung der Kratergrößen-Häufigkeitsverteilung zu den großen Einschlagsstrukturen umfasste drei Schritte:

1. Identifizierung von konzentrischen Strukturen und Palimpsesten in geeignet kontrast- und kantenverstärkten Bilddaten,
2. geologische Kartierung dieser Strukturen,
3. Bestimmung des nominellen Kraterdurchmessers, d. h. des Durchmessers des tatsächlichen Kraterandes zur statistischen Erhebung der Größen-Häufigkeitsverteilung.

Die Strukturen wurden in den Gebieten *RM-1* (mit *RM-2*), *RM-4* und *RM-5* kartiert. Die Lage dieser Gebiete und ihre Korrelation mit SSI-Zielgebieten geht aus Abb. 8.1 (Abschnitt 8.1) hervor.

Bildkontraste und Kanten konnten durch den Einsatz von Doppelfiltern verstärkt werden (vergl. Abschnitt 7.2.4.2). Bei der Kartierung dieser Strukturen wurde der Kontrast gegebenenfalls am

Rechner interaktiv noch einmal verstärkt. Kartiert wurden die am sichersten zu identifizierenden "Ringe" eines Beckens bzw. die äußere Begrenzung der Palimpseste. Anhang B enthält die Kartierungen dieser Becken in den Abbildungen B.1 bis B.6. Die mit nachfolgend beschriebener Methode berechneten nominellen Durchmesser sind in den Tabellen B.1 bis B.6 in Anhang B aufgelistet.

Schenk und Ridolfi (2002) tabellierten Radien von Kratern und kontinuierlichen Ejekta bei regulären Kratern, Dom-Kratern und Penepalimpsesten auf Ganymed, Callisto und einigen Saturnsatelliten und konnten einen rechnerischen Ausdruck zwischen beiden Größen herleiten. Die gleiche Beziehung ermöglicht die Berechnung nomineller Kraterdurchmesser bei Palimpsesten, deren Kraterdurchmesser morphologisch so gut wie nicht nachweisbar ist. Bei den Palimpsesten herrschte vor der Galileo-Mission die gängige Ansicht, dass die äußere Grenze des hellen, nahezu kreisförmigen Bereichs zu den umgebenden dunkleren Krateren der Grenze der kontinuierlichen Ejekta entspricht (z. B. *Passey und Shoemaker*, 1982). Durch Auswertung hoch aufgelöster SSI-Daten konnte dies bestätigt werden, unter anderem durch das Auftreten radialer Sekundärkraterketten genau außerhalb des hellen Bereichs bei einigen Palimpsesten (*Moore et al.*, 1998).

Für die Schwerpunkte ihrer Messungen leiteten *Schenk und Ridolfi* (2002) folgende Beziehung ab:

$$D_{ej} = a \cdot D_c^b. \quad (8.2)$$

Die Größen D_{ej} und D_c entsprechen dem Durchmesser der kontinuierlichen Ejekta bzw. dem nominellen Kraterdurchmesser. Als Durchmesser der kontinuierlichen Ejekta wird der innerste Rand des Einsetzens von Sekundärkratern verstanden (ebd.). Die Werte der beiden Konstanten betragen $a = 4.931$ und $b = 0.85^{78}$. Die beiden Konstanten wurden für Krater auf Ganymed (das Gilgamesh-Becken eingeschlossen) bestimmt. Die Autoren konnten zeigen, dass die gleiche Formel ohne Änderung für Impaktstrukturen auf Callisto sowie für einige Saturnsatelliten anwendbar ist (ebd.).

Die Herleitung eines nominellen Kraterandes ist bei stark abgetragenen Palimpsesten problematisch, da ihr Umriss teilweise erheblich von einer Kreisform abweicht. Ein Durchmesser wurde daher an der breitesten Stelle qualitativ eingepasst, so dass die gesamte Struktur noch innerhalb des Kreises liegt. Die Berechnung des nominellen Kraterandes bei Ringbecken gestaltet sich dagegen sehr viel schwieriger. Lediglich bei Asgard und Valhalla sind die kontinuierlichen Ejekta - bzw. der innerste Grenzdurchmesser des Vorkommens von Sekundärkratern (*Schenk und Iaquina-Ridolfi*, 1995; *Schenk und Ridolfi*, 2002) - teilweise noch nachweisbar, und ein nomineller Kraterand für diese beiden Becken ergibt sich aus obiger Gleichung 8.2. In allen übrigen Fällen sind dagegen nur noch schwach ausgebildete "Ring"strukturen, aber keine kontinuierlichen Ejekta oder Sekundärkrater erkennbar. Die einzige Möglichkeit besteht daher darin, den Durchmesser aus dem äußersten Ringdurchmesser in grober Näherung herzuleiten.

Der Vergleich mit Becken auf dem Erdmond zeigt, dass das Verhältnis zwischen dem so genannten Haupttring D_c , der dem Kraterand entspricht, und dem äußersten noch erkennbaren Ring

⁷⁸Zur Berechnung des nominellen Kraterdurchmessers wurde die Formel umgestellt und nach dem Durchmesser D_c aufgelöst: $D_c = 10^{\frac{\log D_{ej} - \log a}{b}}$.

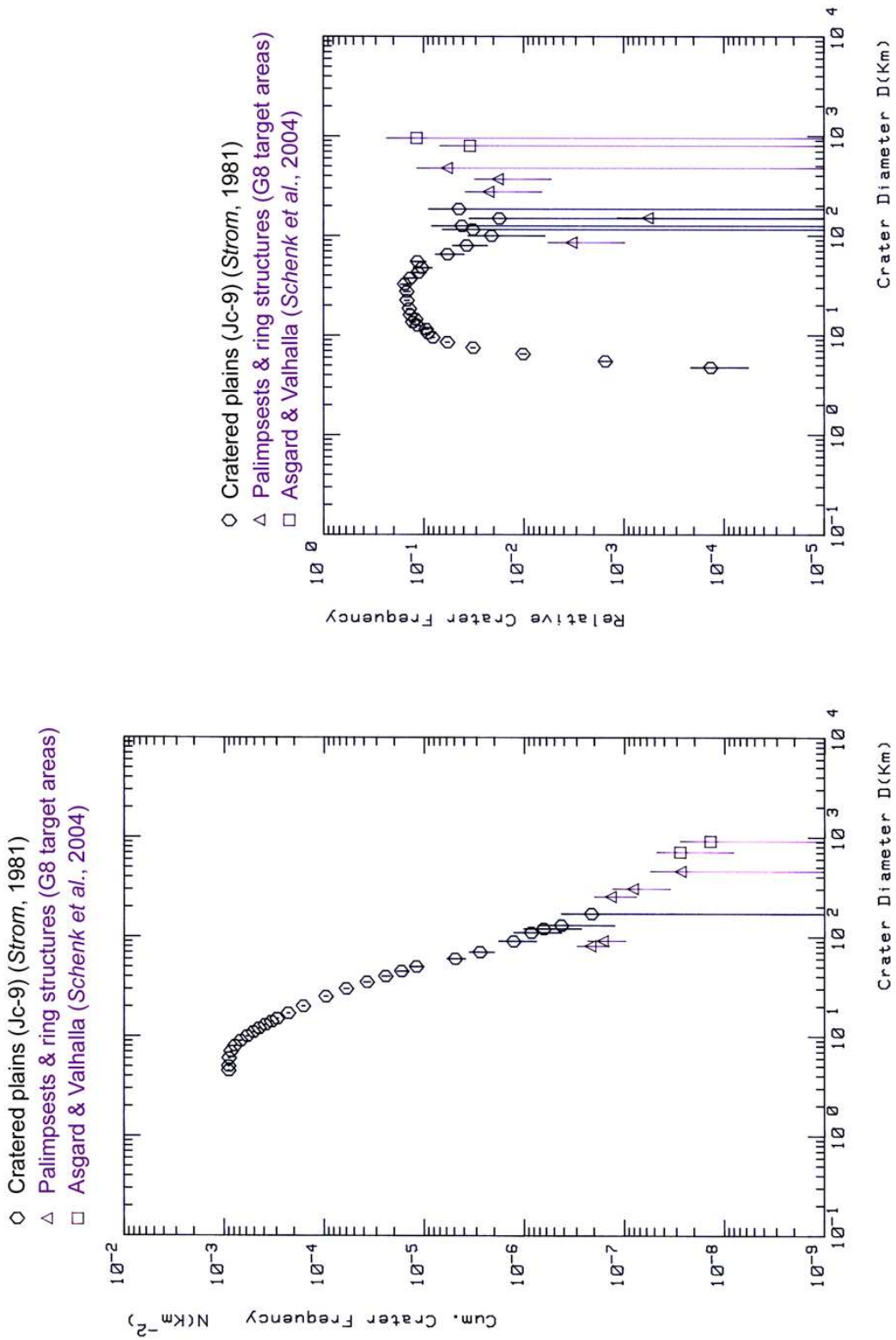


Abbildung 8.60.: Kumulative und relative Kraterhäufigkeiten der Kraterebenen und der großen Impaktstrukturen; weitere Erläuterungen im Text.

D_o etwa durch eine lineare Beziehung der Art $D_c \approx k \cdot D_o$ beschrieben werden kann, wobei die Werte für k etwa zwischen 0.35 und 0.65 liegen können (vergl. *Pike und Spudis*, 1987). Für das Valhalla-Becken folgt bei einem äußeren Durchmesser von 3800 - 4000 km und $k = 0.25$ ein nomineller Kraterdurchmesser von ≈ 1000 km, der ziemlich genau dem von *Schenk und Ridolfi* (2002) aus obiger Beziehung 8.2 ermittelten Wert entspricht. Für Asgard ergibt sich aus einem äußersten Durchmesser von 1800 - 1900 km und $k = 0.25$ ein nomineller Durchmesser von ≈ 500 km. Aus Gleichung 8.2 fanden da Autoren dagegen einen Durchmesser von etwa 675 km, entsprechend Werten von $k \approx 0.35$.

Die in den Tabellen B.1 bis B.6 in Anhang B gegebene Aufstellung einer Größenstatistik von Palimpsesten und Ringbecken enthält daher große Unsicherheiten. Es ist nicht klar, ob die als äußerste "Ring"durchmesser angegebenen Werte von D_o der maximalen Ausdehnung des jeweiligen Beckens entsprechen, oder ob das Becken nicht noch größer ist, da weitere Ringe wegen der starken Abtragung und Überdeckung mit jüngeren Einheiten nicht mehr nachweisbar sind. Ferner ist die genaue Skalierung vom äußersten Ring zum nominellen Kraterdurchmesser nicht exakt abzuleiten. Die Rückrechnung nach Gleichung 8.2 ist nicht durchführbar, da dazu kontinuierliche und diskontinuierliche Ejekta eindeutig zu identifizieren werden müssten. Es werden daher Werte für $k = 0.25$, $k = 0.35$ und $k = 0.5$ angegeben. Sehr wahrscheinlich besteht zwischen Kraterdurchmesser und maximalem Ringdurchmesser eine ähnliche (nicht-lineare) Beziehung wie in Gleichung 8.2. Wegen der genannten Probleme ist diese jedoch aus dem vorliegenden Bildmaterial nicht herleitbar.

Die Kraterverteilung großer Einschlagsstrukturen nach der beschriebenen Methode ist in kumulativer und relativer Form in Abb. 8.60 dargestellt. Trotz der genannten Einschränkungen in der exakten Durchmesserbestimmung geht die einer asteroidalen Größenverteilung vergleichbare Wellenstruktur klar aus dem relativen Diagramm hervor (vergl. *Wagner et al.*, 2004, 2006c). Die oftmals diskutierte "Verarmung" an großen Impaktstrukturen und demzufolge Projektilen im Jupitersystem ist daher nicht vorhanden, wie bereits unabhängig voneinander und fast zeitgleich von *Schenk* (1998) und *Klemaszewski et al.* (1998a) festgestellt. Allerdings beruht die Untersuchung von *Schenk* (1998), zusammengefasst in *Schenk et al.* (2004), nur auf einer eingeschränkten Zahl von Ringstrukturen, verglichen mit den in den Tabellen B.1 bis B.6 (Anhang B) aufgelisteten Strukturen. Zudem bestreiten *Schenk et al.* (2004) die Existenz einer ähnlich großen Zahl von Palimpsesten wie auf Ganymed, im Gegensatz zu Erkenntnissen aus dieser Arbeit.

Bild 8.60 zeigt deutlich, dass Impaktstrukturen im Durchmesserbereich oberhalb 5 - 10 km bis zu den größten Becken wie Valhalla mit einem nominellen Kraterdurchmesser nahe 1000 km durch eine asteroiden-ähnliche Projektil-Größenverteilung entstanden sind, trotz der oben genannten großen Unsicherheiten in der Durchmesserbestimmung. Die Krater auf Callisto gingen somit zum überwiegenden Teil aus Einschlägen einer Projektilfamilie mit Kollisionentwicklung hervor. Für die Asteroiden ist diese Kollisionsentwicklung nachgewiesen (*Durda et al.*, 1998; *Werner et al.*, 2002), für Kometen und KBOs dagegen nicht, wird aber von einigen Autoren ebenfalls vermutet (vergl. *Davis und Farinella*, 1997).

8.6.8. Die Kraterebenen in regionaler bis hoher Bildauflösung

8.6.8.1. SSI-Zielgebiet 20CSCRSTAT02 (265 m/pxl)

Für den vierten gezielten Vorbeiflug Galileos an Callisto (Orbit C20) waren mehrere Sequenzen geplant, die die Kraterebenen in regionalem Maßstab abbilden sollten. Ein Mosaik der SSI-Aufnahmen eines dieser Zielgebiete (20CSCRSTAT02) im Voyager-Kontext stellt Bild 8.61 dar⁷⁹. Die geographische Lage der C20-Zielgebiete zeigt Bild 5.5 in Abschnitt 5.4.3.

Die aus zwei SSI-Bildern mit 265 m/pxl Auflösung bestehende Bildsequenz liegt nordöstlich des hellen Strahlenkraters Bran bei etwa 9° Nord und 183.5° West. Durch die bereits tief stehende Sonne (Einfallswinkel 85°) werden morphologische Details verstärkt. Einige der hellen Kraterränder sind an einigen Stellen überbelichtet (so genannte *icycles*, z. B. an den mit c_2 und c_3 bezeichneten Kratern).

Die Kraterdichte ist sehr hoch und suggeriert, begünstigt auch durch die Beleuchtungsgeometrie, eine "Sättigung" mit Kratern. Der größte Teil der Krater dieses Gebiets gehört der Erosionsklasse c_2 (bzw. *VAc*) mit weitgehend erhaltenen Rändern, Zentralbergen und Ejekta an. Das Gebiet zwischen den Kratern (*intercrater plains*) ist mit dunklem Material bedeckt, das vielerorts glatt erscheint. Einige Bereiche, etwa helle Kraterjekta oder das Innere heller Krater, sind durch Honigwabentextur gekennzeichnet. An diesen Stellen überdeckt der dunkle Verwitterungsrückstand das hellere anstehende Material nur unvollständig.

Ein System aus Albedolineamenten mit Vorzugsrichtung NE-SW bis ENE-WSW ist nachweisbar. Einige dieser Lineamente sind in Bild 8.61 durch Pfeile markiert. In einigen Fällen folgen eckige Kraterränder diesen Richtungen (etwa bei dem mit c_3 bezeichneten Krater). Es ist zwar gut möglich, dass es sich dabei weitgehend um Artefakte handelt, oder die zufällig lineare Anordnung von Geländeformen ein Lineamentsystem vortäuscht. Andererseits stimmen die Hauptrichtungen überein mit denen, die auch an anderen Stellen festgestellt wurden (Diskussion hierzu in Abschnitt 8.6.11).

Die in Bild 8.62 dargestellte kumulative Verteilung dieses Zielgebiets fällt bei Durchmessern oberhalb von 20 km weitgehend mit der auf den Voyager-2-Daten (Kontext) gemessenen Verteilung zusammen. In diesem Größenbereich ist die Verteilung in den SSI-Daten steiler, da das Gebiet sehr klein ist und folglich zu wenige größere Krater vorhanden sind. Zwischen Durchmessern von etwa 15 km und 7 km liegen die Messpunkte auf bzw. etwas über der (lunaren) Equilibriumsverteilung. Es deutet sich an, dass die Verteilung unterhalb von etwa 4 km flacher wird, und zwar noch vor Erreichen der theoretischen Bildauflösungsgrenze, die wegen des Verlusts kleiner Krater bei der Messung, bedingt durch den starken Schattenwurf, etwa bei 1.5 bis 2 km liegt. Erosion der Krater in diesem Durchmesserbereich ist, wie auch an anderen Stellen zu beobachten, dafür die Hauptursache.

Das Zielgebiet 20CSCRSTAT02 umfasst eine *Cratered-plains*-Einheit Asgardisch-/prä-Asgardischen Alters (ersteres gemessen im Voyager-Kontext). Von einer "Sättigung" mit Kratern

⁷⁹Die Aufnahmen des Zielgebiets 20CSCRSTAT01 sind vollkommen unscharf und daher unbrauchbar.

CALLISTO: SSI target area 20CSCRSTAT02 (265 m/pxl)

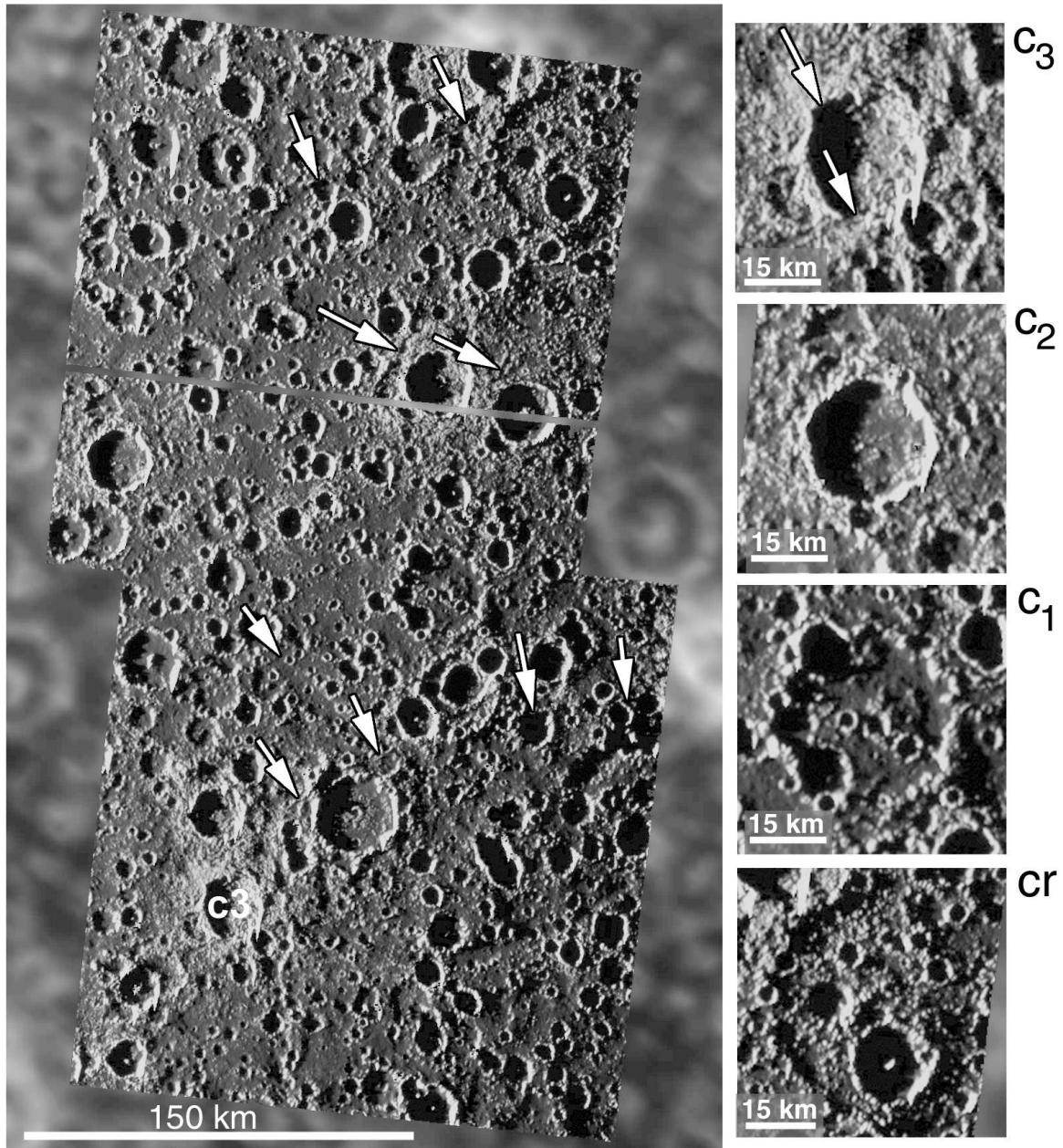


Abbildung 8.61.: Mosaik des SSI-Zielgebiets 20CSCRSTAT02 in Voyager-2-Kontext. Bildauflösung der Voyager-2-Daten etwa 2.5 km/pxl gegenüber 265 m/pxl der SSI-Daten. SSI-Bildnummern 20C0010 und 20C0011. Die Typlokalitäten der vier Krater-Erosionsklassen c_3 bis c_1 (mit cr) sind vergrößert dargestellt. Die Erosionsklassen entsprechen jeweils den chronostratigraphischen Einheiten BVc , VAc und $ApAc$. Pfeile zeigen einige der im Text erwähnten Lineamente an.

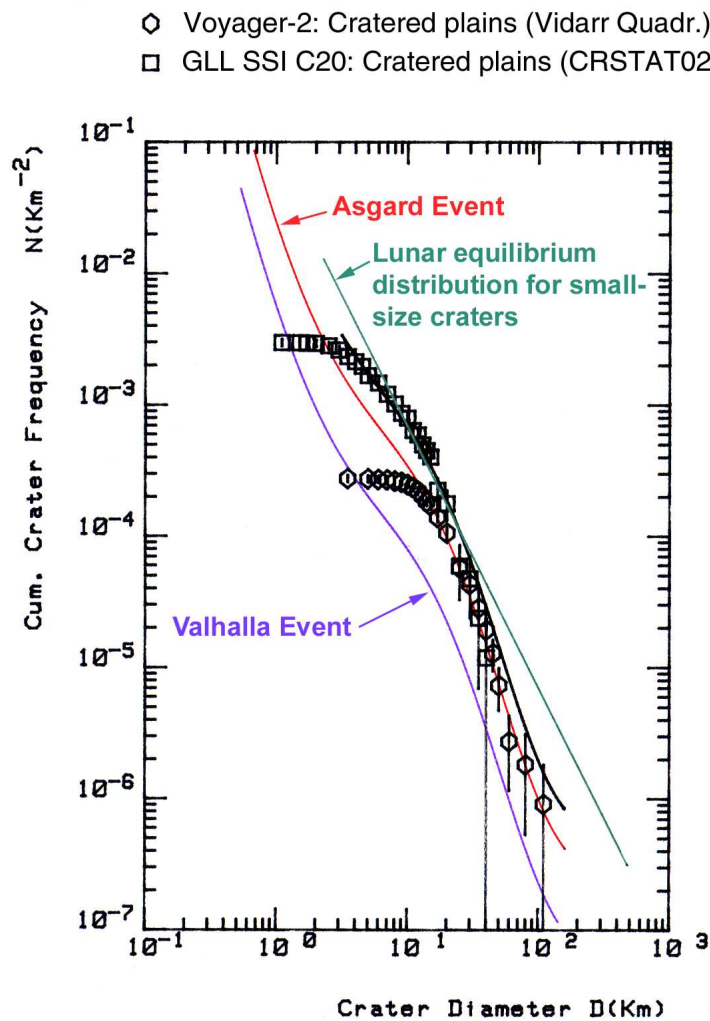


Abbildung 8.62.: Kumulative Häufigkeitsverteilung des Zielgebiets 20CSCRSTAT02 in Voyager-2-Kontext. Zum Vergleich sind die Kurven der beiden großen Becken Asgard (rot) und Valhalla (violett) sowie die Equilibriumsverteilung eingezeichnet.

bzw. einer Equilibriumsverteilung, wie aus der hohen Kraterdichte in Abbildung 8.61 vielleicht zu schließen wäre, ist dennoch nicht zu sprechen, da (a) nur ein eingeschränkter Durchmesserbereich auf oder über der (lunaren) Equilibriumsverteilung liegt, (b) das tatsächliche Equilibrium einen Faktor 2 - 3 unterhalb oder oberhalb der in der Abbildung eingezeichneten Equilibriumsverteilung liegen kann, und (c) kleinere Krater unterhalb 3 - 4 km Durchmesser zum Teil durch Erosion zerstört sind, eine mögliche ursprüngliche Equilibriumsverteilung in diesem Durchmesserbereich also nicht mehr festzustellen ist.

8.6.8.2. SSI-Zielgebiet C9CSCRATER01 (156 m/pxl)

In einem früheren Orbit (C9) wurde ein aus sechs Bildern bestehendes Mosaik der Kraterebenen östlich des Valhalla-Beckens aufgenommen (zur Lage siehe Abb. 5.5, Abschnitt 5.4.3, und Abb. 8.50, Abschnitt 8.6.1). Die Bildauflösung der Daten dieses Zielgebiets C9CSCRATER01 beträgt 156 m/pxl. Im Vergleich zu den Daten von 20CSCRSTAT02 steht die Sonne höher über dem Gelände (15° gegenüber 5° bei 20CSCRSTAT02). Bild 8.63 zeigt einen Ausschnitt des gesamten Mosaiks (Footprint 2x3) im Kontext von Voyager-1-Bilddaten.

Wie im Zielgebiet 20CSCRSTAT02 ist hier die Kraterdichte ebenfalls sehr hoch. Anders als in 20CSCRSTAT02 erscheinen die meisten Kraterränder weitgehend durch dunkles Material überdeckt, das Gelände wirkt vergleichsweise "weicher". Das Zielgebiet könnte im Inneren eines alten, jedoch nicht mehr durch konzentrische Strukturen nachweisbaren Beckens liegen und von dunklem Verwitterungsrückstand in größerer Mächtigkeit überlagert werden, als es im Zielgebiet 20CSCRSTAT02 der Fall ist. Dies kommt auch in den niedriger aufgelösten Daten (Voyager-1) zum Ausdruck, wie aus Bild 8.50 (Abschnitt 8.6.1) hervorgeht. Das mit **C9** bezeichnete Zielgebiet liegt innerhalb einer einheitlich dunklen bzw. dunkelblauen (in Abb. 8.50 mit **D** bezeichneten) Einheit.

Der höhere Sonnenstand und die vermutlich mächtigere Überdeckung mit dunklem Material verleihen dem Gebiet glattere Formen als in 20CSCRSTAT02. Eine Reihe von Kratern sind teilweise bis über den Kraterrand aufgefüllt. Derartige "Geisterkrater" sind in Bild 8.63 mit **g** gekennzeichnet.

Auffälligstes Geländemerkmal ist ein mehrere Zehnermeter (Schattenmessungen) hoher Zentralbergkomplex (**cpk**) innerhalb eines etwa 40 km großen, stark abgetragenen Kraters, der von einem weiteren Kraterrand mit einem Durchmesser von etwa 60 km konzentrisch umgeben ist. Der kleinere Krater mit dem Zentralberg liegt vermutlich zufällig zentriert innerhalb des größeren. Die Ränder beider Krater (**cr**) sind besonders im westlichen und nordwestlichen Sektor fast vollkommen abgetragen, bzw. werden durch einen jüngeren Krater mit Zentralberg (Typ c_2 , Durchmesser 20 km) überlagert.

Der an seiner Spitze mit Frost überzogene Zentralberg fällt in den niedrig aufgelösten Voyager-1-Daten als heller Punkt auf (Pfeil in Bild 8.50, Abschnitt 8.6.1). Lediglich der innere kleinere Krater ist in den Voyager-Daten noch zu unterscheiden, der größere dagegen nicht. Obwohl dies im vorliegenden Gebiet nur einmal auftritt, könnte man daraus schließen, dass solche größeren Kraterstätten bei vergleichbarer Bildabdeckung häufiger zu beobachten wären. Dies und die Tatsache, dass bei genügender Auflösung (z. B. SSI) mehr alte, abgetragene Becken, Palimpseste, "Geisterkrater" oder andere größere, aber stark abgetragene Impaktstrukturen nachzuweisen sind, ist ein Indiz dafür, dass die Ursache für den mehrfach diskutierten Mangel an großen Einschlagsstrukturen über etwa 60 km Durchmesser (der so genannte *dearth in large craters*, vergl. *Strom et al.*, 1981) vorwiegend in der Qualität der Voyager-Daten zu suchen ist. Diese Einschlagsstrukturen konnten von verschiedenen Auswertungen nicht in ausreichender Zahl erkannt werden. Daraus wurde der Schluss auf eine geringere Anzahl großer Projektile im Jupitersystem gezogen.

CALLISTO: SSI target area C9CSCRATER01 (156 m/pxl)

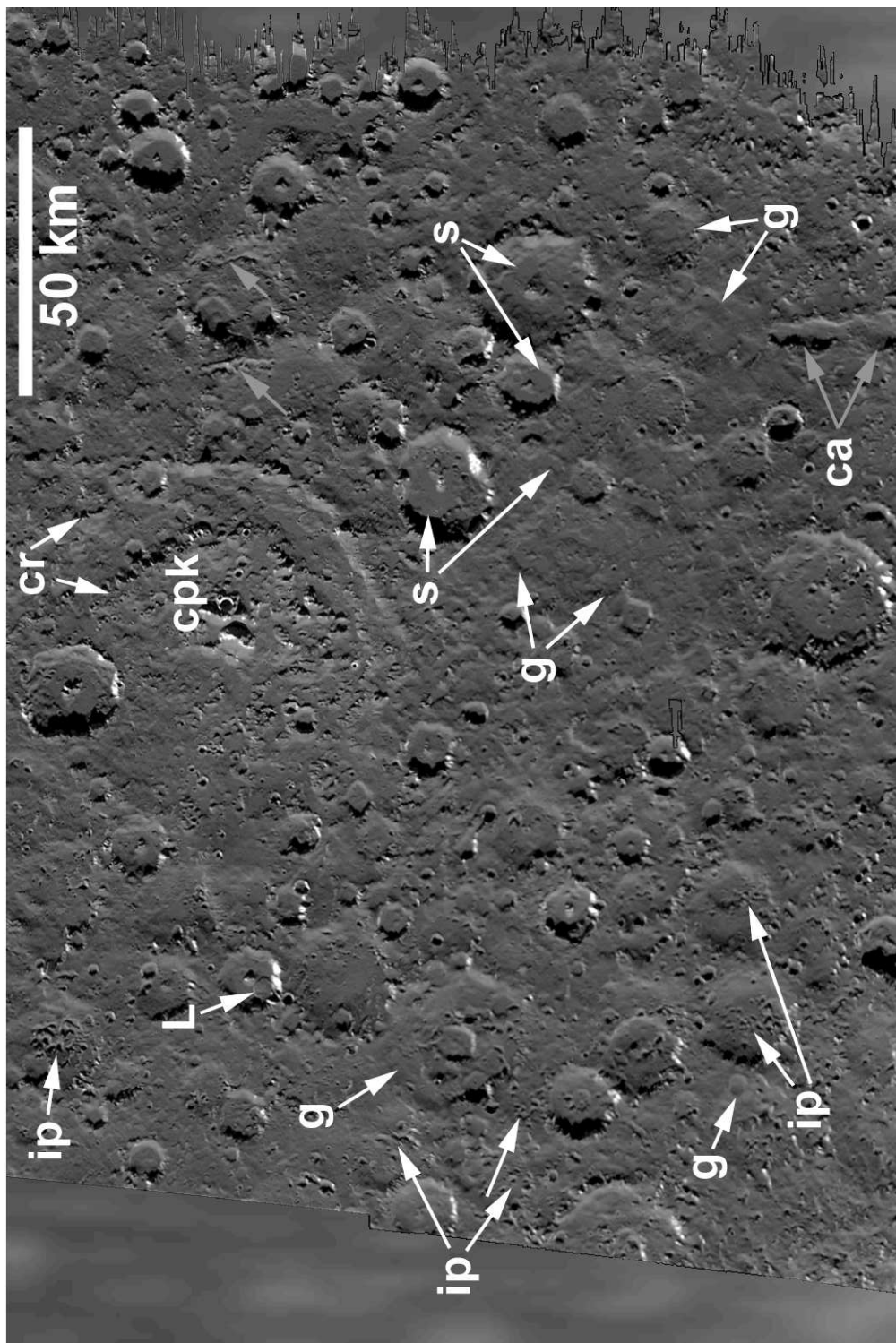


Abbildung 8.63: Ausschnitt des Mosaiks des SSI-Zielgebiets C9CSCRATER01 in Voyager-1-Kontext. Bildauflösung der Voyager-1-Daten 2 km/pxl gegenüber 160 m/pxl der SSI-Daten. SSI-Bildnummern des Bildausschnitts C9C0007 bis C9C0010. Die Daten sind BARC-komprimiert (vergl. Abb 6.5 in Abschnitt 6.2.3). Erläuterung der eingezeichneten Symbole im Text.

An einer Stelle enthält einer der Krater im Innern eine der bereits früher genannten lobenförmigen Ablagerungen mit einem nach außen gerichteten Steilhang (**L**) (*Chuang und Greeley, 2000*) (vergl. hierzu auch Abschnitt 8.5.7). Diese Formen sind in der Regel erst auf Bilddaten unter 200 m/pxl Auflösung zu erkennen und kommen mit einiger Regelmäßigkeit in entsprechend aufgelösten Zielgebieten vor (z. B. C9CSCRATER01, 10CSASGARD01).

Einige Stellen erscheinen bei gegebener Bildauflösung vollkommen glatt (**s** in Bild 8.63). Es erfordert sehr feinkörniges, mobiles Material, um eine fast vollkommen ebene Fläche zu erzeugen. Dafür verantwortlich sind vermutlich Abtragungs- und Ablagerungsprozesse. Der dunkle Verwitterungssückstand rutscht, anders als bei den lobenförmigen Ablagerungen, immer wieder konstant von den inneren Kraterwällen her nach und füllt Vertiefungen allmählich auf.

Alternativ lassen sich die glatten Einheiten allerdings auch als Impaktschmelzen interpretieren. Ähnlich glatte Einheiten - so genannte *impact melt pools* - konnten in Mondkratern (z.B. Tycho) sowohl innerhalb als auch außerhalb des Kraterrandes nachgewiesen werden (*Wilhelms, 1987*). Bei niedrigerer Auflösung sind solche mutmaßlichen *melt pools* nicht festzustellen. Im Zielgebiet 20CSCRSTAT02 kommen sie ebenfalls nicht vor.

Eine weitere Besonderheit des Zielgebiets C9CSCRATER01, sind irreguläre Vertiefungen (*irregular pits*), die meist in Gruppen innerhalb von Kratern (und nur dort) auftreten (**ip** in Bild 8.63) und deren Durchmesser nur wenige hundert Meter betragen. Sie sind Clustern von Sekundärkratern ähnlich. Wegen ihrer vorherrschenden Lage nur im Innern von Kratern ist jedoch zu bezweifeln, dass es sich um Sekundärkrater handelt. *Moore et al. (1999)* vermuteten, dass sie aus ursprünglich geringen Vertiefungen hervorgingen, die durch fortschreitende Sublimation volatiler Substanzen, z.B. H₂O oder CO₂, weiter vertieft wurden. Die höhere Sonneneinstrahlung am äquator-nahen Bereich dieses Zielgebiets kann diese Sublimationseffekte verstärken. Aus dem Schattenwurf wurden Tiefen von bis zu einem Kilometer ermittelt (ebd.). Derartige Vertiefungen konnten in anderen Zielgebieten bisher nicht nachgewiesen werden.

Auswurfsmaterial von einem nicht zu ermittelnden Krater außerhalb des Zielgebiets C9CSCRATER01 - oder alternativ ein sehr schräger Einschlag eines Clusters von Projektilen - hat eine etwa Nord-Süd gerichtete, etwa 30 km lange und einige Kilometer breite, eher einer Furche ähnliche Kraterkette (**ca**, graue Pfeile) und weiter nördlich zwei kürzere, schmälere Furchen (graue Pfeile ohne Bezeichnung) erzeugt.

In Bild 8.64 (a) ist die kumulative Verteilung der Kraterebenen im Zielgebiet C9CSCRATER01 mit ihrem Voyager-1-Kontext der des Zielgebiets 20CSCRSTAT02 gegenübergestellt. Die beiden in C9CSCRATER01 und auf dem Voyager-1-Kontext gemessenen Verteilungen liegen praktisch aufeinander. Die Verteilung der C9-Kraterebenen liegt etwas höher als die Isochrone des Asgard-Events, die stratigraphische Position der Einheit ist daher innerhalb des Messfehlers Asgardisch-/prä-Asgardisch.

Die Verteilungen von C9CSCRATER01 und 20CSCRSTAT02 weichen bei einem Durchmesser von etwa 2 - 3 km beide von der steileren Produktionsverteilungskurve ab und werden flacher (durch den senkrechten Pfeil in Bild 8.64 (a) angegeben). In den mit 156 m/pxl höher aufgelösten Daten von C9CSCRATER01 lässt sich die Verteilung zu Durchmessern unterhalb 2 km weiterverfolgen. Sie wird hier flacher mit einem kumulativen Verteilungsindex von ≈ -1 , der bis zum

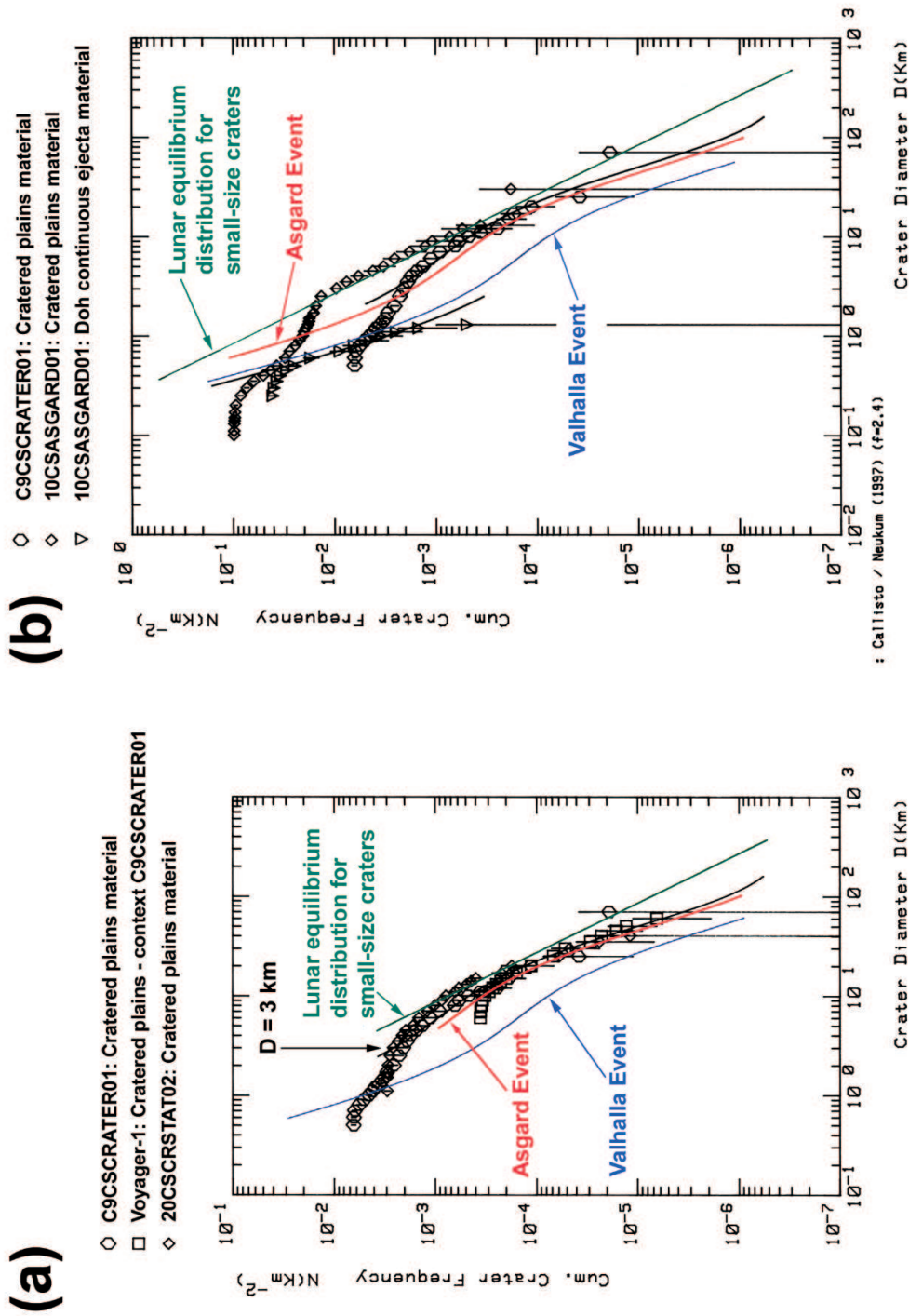


Abbildung 8.64.: Kumulative Häufigkeitsverteilung des Zielgebiets C9CSCRATER01. Das linke Diagramm (a) zeigt die Verteilung im Voyager-1-Kontext, und zum Vergleich die Verteilung des Zielgebiets 20CSRSTAT02 (vergl. Abb. 8.62) sowie die Isochronen der beiden Becken Asgard (rot) und Valhalla (blau). Im rechten Diagramm (b) sind die Verteilungen der Zielgebiete C9CSCRATER01 und 10CSASGARD01 miteinander verglichen. Im Kontrast zu den bei den kleineren Kratern flacher werdenden Verteilungen aus den Kratererebenen steht die steile Verteilung des jüngeren Doh-Domkraters (hier Messungen auf den kontinuierlichen Ejekta *Vloc*).

Erreichen der Auflösungsgrenze bei 700 m Kraterdurchmesser etwa konstant bei diesem Wert bleibt. Obwohl mangels Auflösung nicht nachprüfbar, liegt der Schluss nahe, dass die Verteilung in 20CSCRSTAT02 bei kleineren Kratern unter 2 km Durchmesser ebenfalls einen ähnlichen Verlauf nehmen würde als die des Zielgebiets C9CSCRATER01.

Das rechte Diagramm (b) in Bild 8.64 zeigt einen Vergleich der Messungen aus den Zielgebieten C9CSCRATER01 (156 m/pxl) und 10CSASGARD01 (88 m/pxl). Beide Messungen sind durch einen ähnlichen Verlauf der Verteilung mit einem kumulativen Steigungsindex von etwa -1 bei Durchmessern unter 2 km charakterisiert.

Der nahe Valhalla-Einschlag findet offenbar keinen Niederschlag in der Form der Verteilung. Die Steigung der Verteilung der kleinen Krater zwischen 2 km und 700 m bleibt vollkommen unbeeinflusst an der Stelle, wo die Kurve des Valhalla-Events die Verteilung schneidet. Das Zielgebiet liegt allerdings außerhalb der kontinuierlichen Ejekta Valhallas (*Schenk, 1995*). Sekundärkrater im Größenbereich von etwa 3 bis 10 km könnten aber mitgemessen worden und für den "Buckel" über der an die C9CSCRATER01-Verteilung gefitteten Kurve in diesem Durchmesserbereich verantwortlich sein (Bild 8.64 (b)).

8.6.9. Die Kraterebenen in höchster Bildauflösung

Die höchsten räumlichen Auflösungen der Callisto-Oberfläche, die die SSI-Kamera erzielte, liegen zwischen 15 und 4 m/pxl. Ein gravierender Mangel aller dieser Daten ist jedoch, dass jeglicher geologischer Kontext fehlt. Bei den Daten handelt es sich um Mosaikstreifen (meist 1x2 bis 1x5 Footprints) oder um nebeneinander liegende, aber nicht überlappende Einzelaufnahmen. Die Bildauflösung des Kontexts (Voyager- oder SSI-Daten) beträgt in der Regel mehrere Kilometer pro Bildpunkt. Die am höchsten aufgelösten Daten der Sequenz 30CSHIRES_01 wurden außerdem bei niedrigem Sonnenstand und unter schrägem Blickwinkel aufgenommen, so dass Schatten wesentliche Teile der Bildszene bestimmen und die volle Auflösung nur senkrecht zur Aufnahmerichtung ausgenutzt werden konnte.

8.6.9.1. SSI-Zielgebiet 21CSDRKMAT01 (15 m/pxl)

Die Lage des Mosaiks des Zielgebiets 21CSDRKMAT01 (15 m/pxl Bildauflösung) und den sehr niedrig aufgelösten geologischen Kontext zeigen Abbildung 8.65 (zusätzlich: Abb. 5.5, Abschnitt 5.4.3). Das Zielgebiet liegt westlich von Valhalla und südöstlich von Asgard, jeweils etwa 2000 km von den Zentren beider Becken entfernt. Die weitere Umgebung dieses Zielgebiets wurde während des Orbits G7 durch eine Einzelaufnahme mit nur 6.4 km/pxl (Zielgebiet G7CSGLOBAL01, Bildnummer G7C0001) aufgenommen, also mehr als ein Faktor 400 niedriger in der Auflösung als die C21-Daten⁸⁰.

⁸⁰Die Voyager-Daten des gleichen Gebiets sind mit mehr als 7 km/pxl Auflösung und schrägem Blickwinkel ungeeignet zu detaillierter geologischer Auswertung.

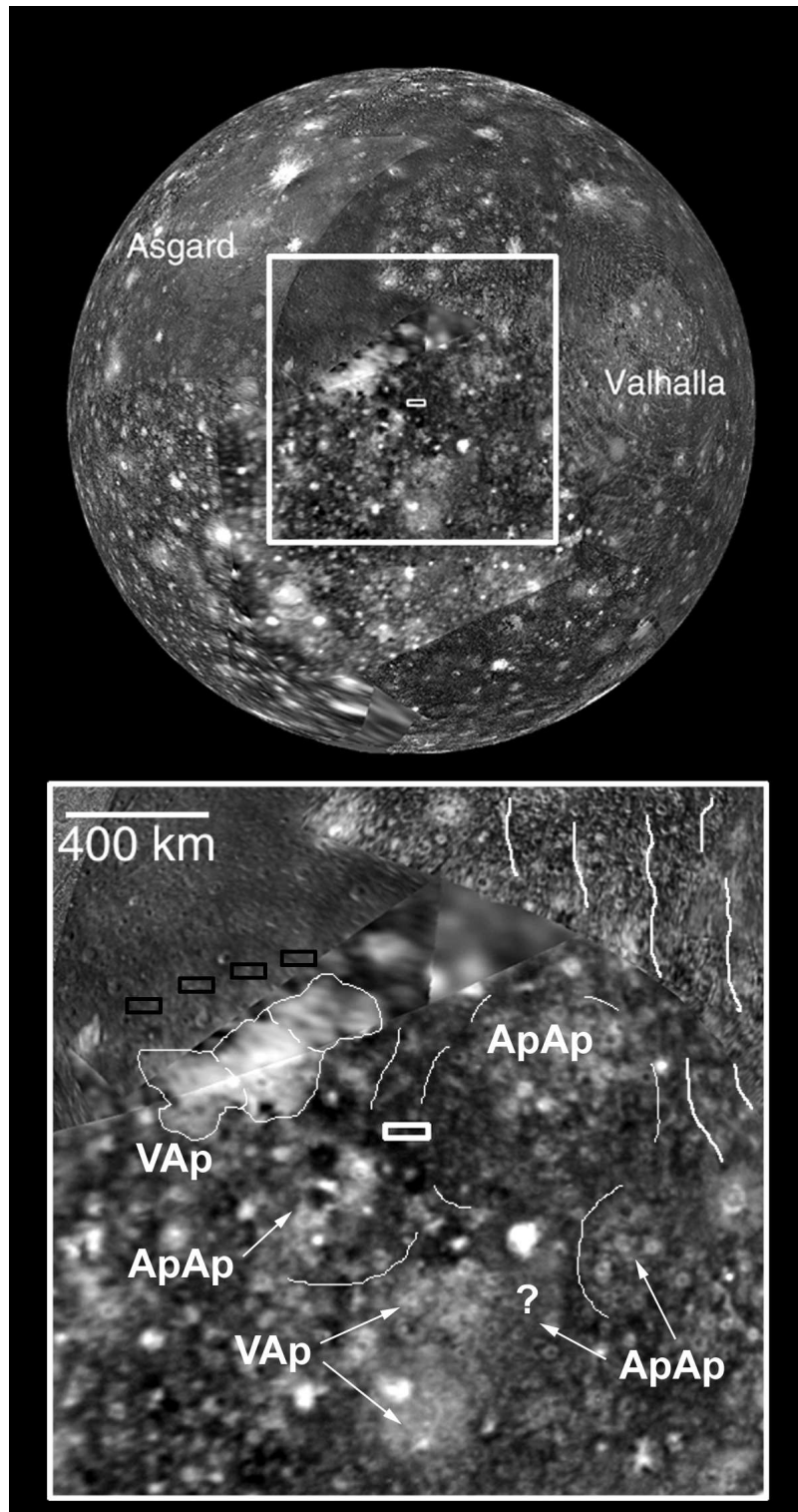


Abbildung 8.65.: Lage und geologischer Kontext der Zielgebiete 21CSDRKMAT01 und 30CSHIRES_01 in niedriger aufgelösten SSI- und Voyager-Daten. Oben: Globale Ansicht von Callisto in orthographischer Projektion (zentriert auf das C21-Zielgebiet, 0.8° N, 106° W, Einzelaufnahme des Zielgebiets G7CSGLOBAL, Bildnummer G7C0001, Auflösung 6.4 km/pxl, in Voyager-Kontext). Das kleine weiße Rechteck im Zentrum des größeren gibt die Lage des Zielgebiets 21CSDRKMAT01 an, die vier schwarzen Rechtecke die der vier Einzelaufnahmen der Sequenz 30CSHIRES_01. Helle Palimpseste (Einheiten **VAp**, **ApAp**), konzentrische Ringe des Valhalla-Beckens (dicke Strichsignatur) und Ringe mutmaßlicher kleinerer Ringstrukturen (dünne Strichsignatur) sind eingezeichnet.

Die Umgebung des bei 0.8° Nord und 106° West gelegenen Zielgebiets 21CSDRKMAT01 ist gekennzeichnet durch dunkle Kraterebenen, unterschiedlich helle Krater und Palimpseste, und Ringe von Valhalla an dessen westlichen Beckenrand (Bild 8.65, unten). Das Zielgebiet selbst (kleines Rechteck in weiß in Abb. 8.65) liegt in einem Bereich vergleichsweise niedriger Albedo. Auffälligstes Geländemerkmale in der Umgebung ist eine etwa 200 auf 600 km² große helle Fläche, die am ehesten als Palimpsest, oder auch als Gruppe von zwei oder drei aneinander stoßenden, vermutlich gemeinsam entstandenen Palimpsesten zu interpretieren ist (**VAp** in Bild 8.65). Weitere vergleichbar große, aber dunklere Palimpseste schließen sich südlich des Zielgebiets an (**VAp**, **ApAp** und Pfeile in Bild 8.65). Neben den Ringen des Valhalla-Beckens sind schwach erkennbare, bogen- oder halbkreisförmige Albedolineamente nachzuweisen, die alten, stark abgetragenen und/oder überdeckten Multiringstrukturen von wenigen hundert Kilometern Durchmesser angehören, wie in Abschnitt 8.6.7 näher ausgeführt.

Im Detail sind die wesentlichen geologischen Einheiten in Abb. 8.66 (a - c) dargestellt. Das dunkle Material lässt sich in zwei Varietäten unterteilen. Die mehr im westlichen Teil des Gebiets gelegene Einheit, **BVds - dark smooth material**, bildet eine weitgehend plane Oberfläche (Bild 8.66 (a)). Die weiter östlich gelegene Einheit, **BVdp - dark pitted and hummocky material** dagegen ist durch eine bewegtere Topographie geprägt (Bild 8.66 (b)). Buckel und Vertiefungen von mehreren 100 m bis 1 km Ausdehnung wechseln einander ab. Die Vertiefungen (*pits*, **p** in Abb. 8.66) ähneln kleinen Kratern ohne Ränder.

In beiden Einheiten sind helle Massive oder Gruppen von Massiven weit verbreitet (kurze, schwarz umrandete Pfeile in Bild 8.66 (a)). Sie sind meist nur wenige Zehner- bis Hundertmeter groß. Aus Schattenlängen ergeben sich Höhen bis zu 200 m (*Basilevsky*, 2002). In einigen Fällen ordnen sich diese Massive ringförmig an. Es handelt sich dabei mit Sicherheit um Reste von Kraterändern. Einige dieser Krater sind vollständig aufgefüllt und nicht einmal mehr als Vertiefung nachzuweisen. In einigen wenigen Fällen sind die Krater noch vorhanden (z. B. **cr** in Bild 8.66 (b)).

Der einzige in diesem Gebiet vorhandene Krater des Typs c_3 mit einem Durchmesser von 1.2 km konnte mithilfe der Kraterverteilung auf der kontinuierlichen Ejektadecke datiert werden. Er liegt am unteren Bildrand (Rechteck in Bild 8.66 (a)) und ist in 8.66 (c) vergrößert dargestellt. Die äußere Grenze seiner kontinuierlichen Ejekta ist nicht genau zu lokalisieren, da sie sich weder durch Albedo- noch durch morphologische Unterschiede von der Umgebung abheben. Die Grenze dürfte, wie bei den meisten anderen Kratern auch, maximal etwa einen Kraterdurchmesser vom Rand entfernt liegen. Der westliche Bereich der Ejekta befindet sich im Schatten, den der Krater selbst und eine Reihe von Massiven werfen.

Für die hellen Blöcke am Rand dieses c_3 -Kraters (Pfeile in Bild 8.66 (c)) gibt es zwei mögliche Erklärungen: Entweder hat sich spät ausgeworfenes Material nahe des Kraterandes abgelagert. Dies ist wegen der Steilheit des Geländes jedoch wenig wahrscheinlich, sie müssten allmählich abrutschen. Eine plausiblere Erklärung ist, dass es sich um genau die "Härtlinge" des Kraterandmaterials handelt, die nach einiger Zeit als einzelne Massive in Ringform übrigbleiben, wenn der gesamte Krater abgetragen und der Boden völlig aufgefüllt ist, und die hier *in statu nascendi* nachzuweisen sind.

Target area 21CSDRKMAT01 (15 m/pxl)

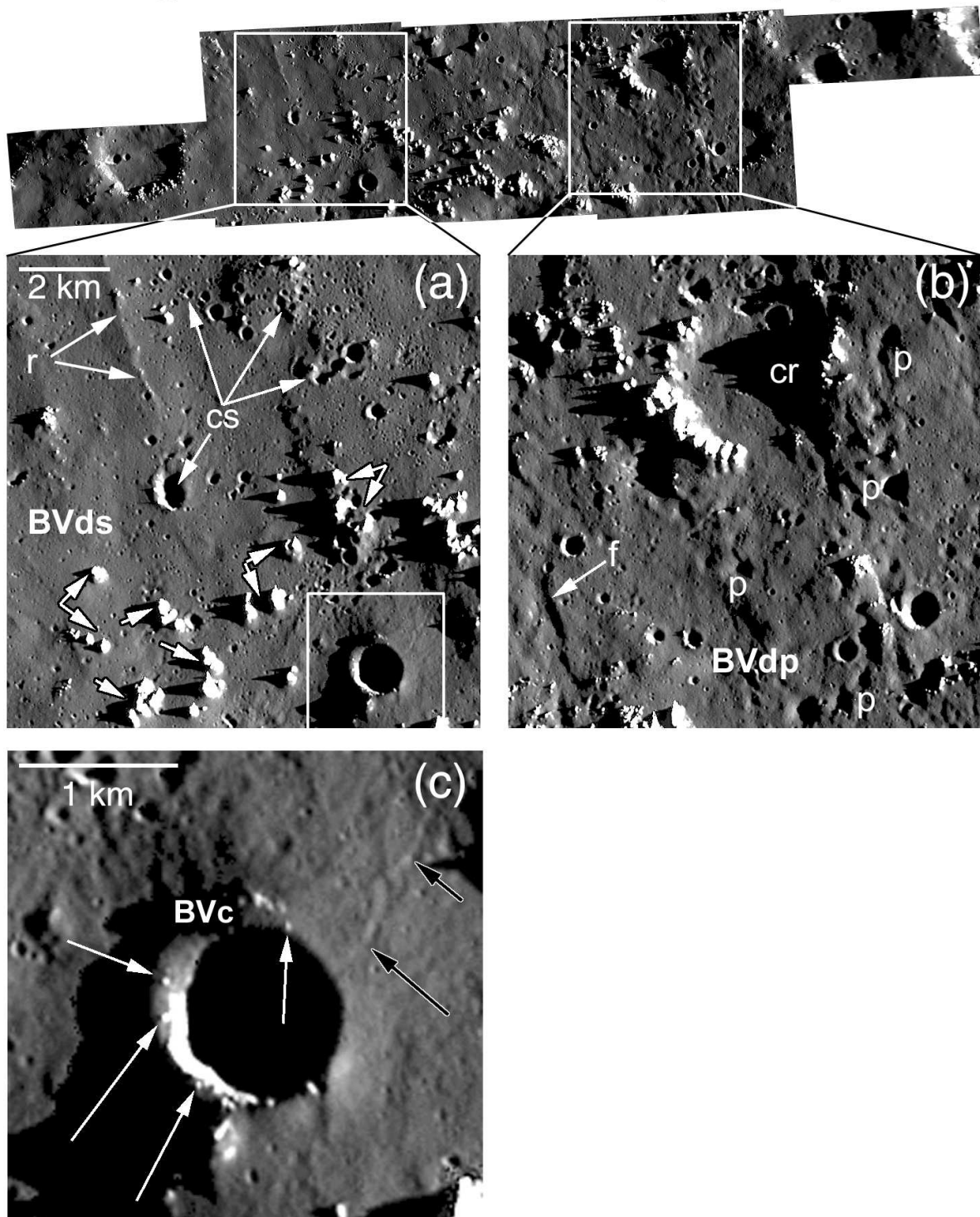


Abbildung 8.66.: Detailansichten geologischer Einheiten im Zielgebiet 21CSDRKMAT01. Das gesamte Mosaik aus den Einzelbildern 21C0001 bis 21C0005 ist oben verkleinert wiedergegeben, ebenso die Lage der beiden Bildausschnitte (a) und (b). (a) Glattes, dunkles Material (Einheit *BVds* - *dark, smooth material*), einbeschriebenes Rechteck: frischer Krater, vergrößert dargestellt in (c); (b) dunkles Material mit Vertiefungen und Kuppen (*BVdp* - *dark, pitted and hummocky material*); (c) Detail des frischen Kraters aus (a), etwa 1.3 km Durchmesser, Einheit (c_3 bzw. *BVc*). Weitere Erläuterung der Symbole im Text.

Geol. Einheit	N_{cum} ($D \geq 1$ km)	Model I [Ga]	Model IIa [Ga]	Model IIb [Ga]
$c_3 = BVc$	$2.18 \cdot 10^{-4}$	2.63	0.12 (0.55, 0.02)	0.312 (0.87, 0.11)
$BVds$	$3.46 \cdot 10^{-4}$ ($5.75 \cdot 10^{-4}$)	3.36 (3.69)	0.18 (0.84, 0.04) (0.5 (2.0, 0.1))	0.48 (1.31, 0.17) (1.24 (2.8, 0.46))
$BVdp$	$3.62 \cdot 10^{-4}$ ($3.36 \cdot 10^{-3}$)	3.38 (3.91)	0.19 (0.88, 0.04) (1.49 (3.93, 0.35))	0.51 (1.36, 0.18) (3.03 (4.39, 1.39))
$pAcp^{(1)}$	$1.16 \cdot 10^{-1}$	4.43	4.56 (4.56, 4.26)	4.56 (4.56, 4.56)

Tabelle 8.7.: Kumulative Häufigkeiten und Modellalter des Zielgebiets 21CSDRKMAT01. Berücksichtigt wurden die beiden Einheiten $BVds$ und $BVdp$ sowie die kontinuierlichen Ejekta eines 1.2 km großen c_3 -Kraters. Bei der kumulativen Häufigkeit wurde nur der Durchmesser 1 km angegeben. Die eingeklammerten Werte stellen einen weiteren Fit dar, der aber durch Messpunkte nicht besonders gut belegt ist. Die Verteilung ist im gefitteten Bereich zwischen etwa 200 m und 1 km relativ flach. ⁽¹⁾Einheit $pAcp$ entspricht der Messung der großen abgetragenen Krater.

Eine schwach erkennbare, radial vom Kraterrand nach außen führende Furche (schwarze, weiß umrandete Pfeile) könnte durch in der Spätphase des Einschlags ausgeworfenes Material entstanden sein, wobei der oder die Blöcke dabei so weit zerkleinert wurden, dass am Ende der Furche nichts mehr davon übrig blieb.

Der Krater lässt sich anhand der Kratermessung (siehe Tabelle 8.7) dadurch als Einheit BVc eindeutig in das Burrianische System (Periode) einordnen⁸¹. Die kumulative Verteilung auf den Ejekta dieses Kraters zeigt Bild 8.67.

Einige Gruppen von Kratern sowie unregelmäßig geformte Krater sind sicher Sekundärkrater (cs in Bild 8.66 (a)). Sie liegen in unterschiedlichen Erosionszuständen vor. Die jeweiligen Ursprungskrater sind nicht bekannt und lassen sich auch auf den umgebenden SSI-Daten wegen der viel zu geringen Auflösung (6.4 km/pxl) nicht identifizieren. Offensichtliche Sekundärkrater wurden bei der Messung der Kraterhäufigkeiten nicht berücksichtigt.

Furchen ähnliche Vertiefungen treten besonders in der östlicheren Einheit $BVdp$ in Erscheinung (angezeigt durch **f** in Bild 8.66). Sie sind einige Kilometer lang, etwa 500 bis 600 m breit und ungefähr Nord-Süd ausgerichtet. Die längeren Furchen in Nord-Süd-Richtung gehören dagegen möglicherweise zu einem alten Ringbecken. Allerdings sind ihre Dimensionen hierzu fast zu gering, da derartige Strukturen meist mehrere Kilometer breit und wesentlich tiefer sind. Das C21-Zielgebiet könnte aber ganz am Rand eines solchen alten Beckens liegen, was die nicht sehr auffälligen Furchen erklären würde. Bild 8.65 zeigt zumindest, dass das Zielgebiet im Bereich eines vermuteten, etwa 400 km großen Beckens liegt, dessen Ringstrukturen genau an dieser Stelle etwa in Nord-Süd-Richtung verlaufen, und diese Richtung stimmt ziemlich genau mit der der Furchen im Zielgebiet überein.

⁸¹Der Zuordnung zum Burrianischen System nach wäre die Einheitenbezeichnung eigentlich Bc . Da die Basis der hellen, frischen Krater der Erosionsklasse c_3 allerdings nicht genau zu datieren, wenigstens aber jünger als Valhalla ist, wie in Abschnitt 8.2.5 ausgeführt, wird hier die Einheitenbezeichnung BVc bei diesem kleineren Krater beibehalten.

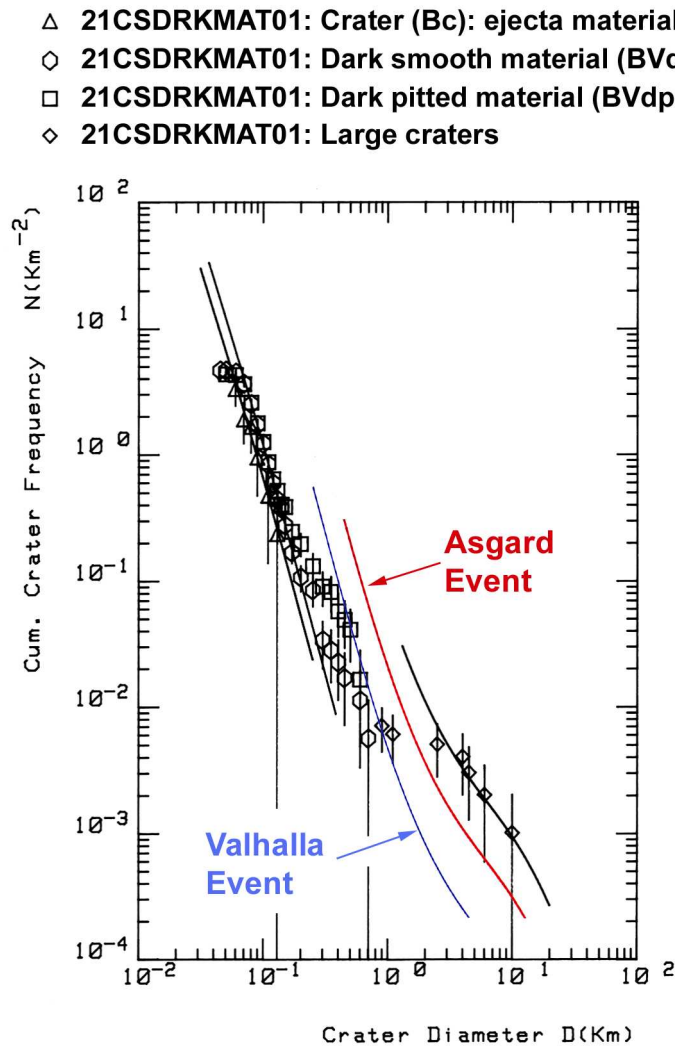


Abbildung 8.67.: Kumulative Häufigkeitsverteilungen des Zielgebiets 21CSDRKMAT01. Aufgetragen sind die Verteilungen der beiden Haupteinheiten (*dark smooth material*, *BVds*) und (*dark pitted material*, *BVdp*), die Verteilung der größeren Krater, und die auf den Ejekta des c_3 -Kraters gemessene Verteilung. Isochronen des Asgard- (rot) und Valhalla-Events (blau) sind eingezeichnet.

Rücken (*ridges*) treten nur vereinzelt im Zielgebiet auf (r in Bild 8.66). Sie erstrecken sich über mehrere Kilometer Länge, sind relativ schmal (Breite höchstens 100 m) und von geringer Höhe (etwa 100 m). Die Rücken sind teilweise so weit abgetragen, dass bis auf die Massive lediglich noch ein "Wulst", bedeckt von dunklem Material, übrig geblieben ist. Die Rücken könnten abgetragene Kraterränder darstellen, oder zu dem vermuteten alten Ringbecken gehören, da die annähernde Nord-Süd-Ausrichtung mit der der Furchen übereinstimmt.

In Bild 8.67 sind die kumulativen Verteilungen der zwei Haupteinheiten des Zielgebiets 21CSDRKMAT01, *BVds* und *BVdp*, und der kontinuierlichen Ejekta des einzigen Kraters des Typs c_3 (bzw. *BVc*) im Vergleich mit der Verteilung der großen, stark abgetragenen prä-Asgardischen

Krater dargestellt. Die Verteilungen zeigen folgende auffallende Charakteristik: Zunächst wird die Verteilung zu den kleinen Kratern flacher, ähnlich wie in den Zielgebieten C9CSCRATER01 oder 10CSASGARD01 (vergl. Bild 8.64, Abschnitt 8.6.8). Unterhalb eines Durchmessers von 150 m dagegen wird die Verteilung wieder steil mit einem kumulativen Verteilungsindex von etwa -3, also vergleichbar den kleinen Kratern auf dem Erdmond. Bis vor Erhalt der C21-Daten war vielfach angenommen worden, es seien wenig kleine Krater und demzufolge weniger kleine Projektile vorhanden (z. B. *Chapman et al.*, 1997). Grund hierfür war aber, dass lediglich die Bildauflösung nicht ausreichte, um diese steile Verteilung nachweisen zu können.

Bei der steilen Verteilung der Krater handelt sich (1) mit Sicherheit um eine (sehr wahrscheinlich asteroidale) Produktionsverteilung, da der kumulative Verteilungsindex etwa -3 beträgt, vergleichbar Verteilungen bei kleinen Kratern auf den terrestrischen Planeten (*Neukum und Ivanov*, 1994) und (2) außerhalb der Cluster und Ketten von Sekundärkratern gemessen wurde. Somit wurde eine primäre Kraterverteilung bestimmt.

Die aus der Verteilung der kleinen Krater abgeleiteten Modellalter sind vergleichsweise niedrig. Sie liegen in *Model I* etwa bei **3.4 Ga**. Die Fehler in *Model I* sind hier wegen des bereits flacher werdenden Verlaufs der Chronologiekurve deutlich höher und betragen etwa ± 0.1 Ga. Ähnliche Häufigkeiten (und Alter) wurden auch auf den Böden einiger der größeren, stark abgetragenen Krater gemessen (in Bild 8.67 aus Übersichtsgründen nicht enthalten). Für *Model IIa* resultierten Alter um die **200 Ma**, also extrem jung verglichen mit der insgesamt alten Callisto-Oberfläche. Etwas höhere Werte ergaben sich für *Model IIb*, nämlich 500 Ma bis 1.5 Ga für die beiden Einheiten *BVds* und *BVdp*.

Jüngste Einheit ist der einzelne *BVc*-Krater mit **2.6 Ga** in *Model I* bzw. mit nur **120 Ma** in *Model IIa*. Aus der Messung der großen Krater auf der Gesamtfläche ergaben sich Alter von 4.43 Ga (*Model I*) bzw. von 4.56 Ga in *Model IIa/b*. Die kleine Messfläche dürfte für dieses hohe Alter verantwortlich sein. Die Häufigkeiten und Modellalter des Zielgebiets 21CSDRKMAT01 sind in Tabelle 8.7 zusammengestellt.

Die jungen Alter lassen sich als Folge einer relativ ungestörten Wiederbekraterung in den durch Erosion und Abtragung älterer Krater geprägten Ebenen erklären. Abtragungsprozesse wirken zwar auf alle Krater ein, machen sich aber stärker bei kleinen Kratern in der Form der Verteilung bemerkbar. Bei den in der Asgardischen oder Prä-Asgardischen Periode entstandenen Kratern drückt sich dies bei Durchmessern unterhalb von etwa 2 - 3 km durch Verteilungsindizes von weniger als -2 aus. Im Durchmesserbereich von 100 m und weniger sind die Krater aus diesen beiden älteren Perioden nicht mehr nachweisbar. In einzelnen Fällen, etwa im Zielgebiet C3CSCATENA01, konnte aus der Zählung vermuteter kleiner Kraterstätten die ursprüngliche Produktionsverteilung einer annähernd Asgardischen Verteilung rekonstruiert werden (vergl. Bild 8.53 (a), Abschnitt 8.6.3).

Sublimationsverwitterung und -abtragung wird als Hauptfaktor für das Verschwinden topographisch hoch gelegener Gebiete wie Kraterhöhen angesehen (*Moore et al.*, 1999). Dieser Prozess ist Callisto-spezifisch: Auf Ganymed ist diese auffallende S-Form in den kumulativen Verteilungen zwischen den größeren und kleineren Kratern nicht nachzuweisen (*Moore et al.*, 2004; *Neukum*, 1997; *Neukum et al.*, 1998, 2007). Sie ist somit eindeutig geologisch bedingt und nicht

die Folge einer besonderen Größenverteilung der Projektile.

Das durch die Sublimationsverwitterung allmählich angehäuften dunkle, feinkörnige Material rutscht von den Hängen nach unten und füllt die tiefer gelegenen Bereiche innerhalb und außerhalb der größeren Krater auf. Daher gibt es in den Häufigkeiten kaum Unterschiede in den Verteilungen zwischen den Kratern und im Inneren alter Krater.

Bild 8.67 zeigt, dass die Häufigkeitsverteilung, die auf der Ejektadecke des c_3 -Kraters gemessen wurde, nur wenig tiefer liegt als die Häufigkeit der umgebenden Einheit (*BVds*). Dennoch unterscheiden sich die Alter des Kraters und der dunklen Ebenen in *Model I* um fast 800 Ma. Sollte das Alter dieses Kraters wirklich bei "nur" 2.63 Ga liegen, ist daraus zu schließen, dass Verwitterung und Abtragung der Geländeformen sehr langsam ablaufen und dieser Zeitraum bis heute nicht ausreichte, um den frischen Krater bis auf eine Ruine abzutragen. Die blockartigen hellen Massive auf und innerhalb des Kraterrandes zeigen, dass der ursprüngliche Kraterrand bereits auf ein topographisch niedrigeres Niveau abgetragen ist, während einige Härtlinge (die hellen Massive) ungefähr auf dem Ausgangsniveau geblieben sind. Über einen sehr viel längeren Zeitraum könnte dieser Krater schließlich so aussehen wie der mit **cr** bezeichnete Krater in Abb. 8.66.

Die effektivere Zerstörung von Kratern in früherer Zeit war vermutlich durch den hohen Projektilfluss während der Zeit des heftigen Meteoritenbombardements begünstigt. Ein erhöhter Wärmefluss in dieser Zeit könnte die Verflüchtigung der volatilen Substanzen (z. B. CO_2) aus dem anstehenden "Fels"-Eis-Gemisch zusätzlich unterstützt haben (*Greeley et al.*, 2000b). Gegen diese mögliche Interpretation steht, dass in einigen größeren Kratern, die noch in dieser Zeit entstanden (z. B. Doh), eine Erosion kleiner Krater wie in den Ebenen nicht festzustellen ist, sondern stattdessen eine steile Produktionsverteilung vorliegt. Die Kraterverteilung ist hier jedoch nicht bis zu kleinsten Durchmessern im Zehnermeterbereich verfolgbar, da die Auflösung hierzu nicht ausreicht.

8.6.9.2. SSI-Zielgebiet 30CSHIRES_01: 4 - 9 m/pxl

Die letzten und bisher am höchsten aufgelösten Bilddaten nahm die SSI-Kamera während der C30-Umkreisung um Jupiter auf. Die aus vier nicht gegenseitig überlappenden Einzelbildern bestehende Bildsequenz 30CSHIRES_01 liegt etwas nordwestlich des Zielgebiets 21CSDRKMAT01. Die ungefähre Lage der vier Aufnahmen (Bildnummern von Ost nach West: 20C0001, 4 m/pxl Auflösung, bis 30C0004, 9 m/pxl) zeigt Bild 8.65 (schwarze Rechtecke). Auch hier fehlt wie in den C21-Daten der genaue geologische Kontext.

Ausschnitte der beiden Einzelaufnahmen 30C0002 (7 m/pxl Auflösung) und 30C0004 (9 m/pxl) sind in Abbildung 8.68 dargestellt. Die SSI-Kamera blickte schräg auf die Oberfläche. Die hohe Bildauflösung kommt daher nur senkrecht zur Blickrichtung zum Tragen.

Das Gelände in beiden Aufnahmen ähnelt dem der C21-Daten. Das dunkle Material ist weitgehend eben oder leicht wellig und der Einheit *BVds* (*dark, smooth material*) aus C21 vergleichbar. Viele der kleinen Krater weisen kaum ausgeprägte Ränder auf. Helles Material liegt

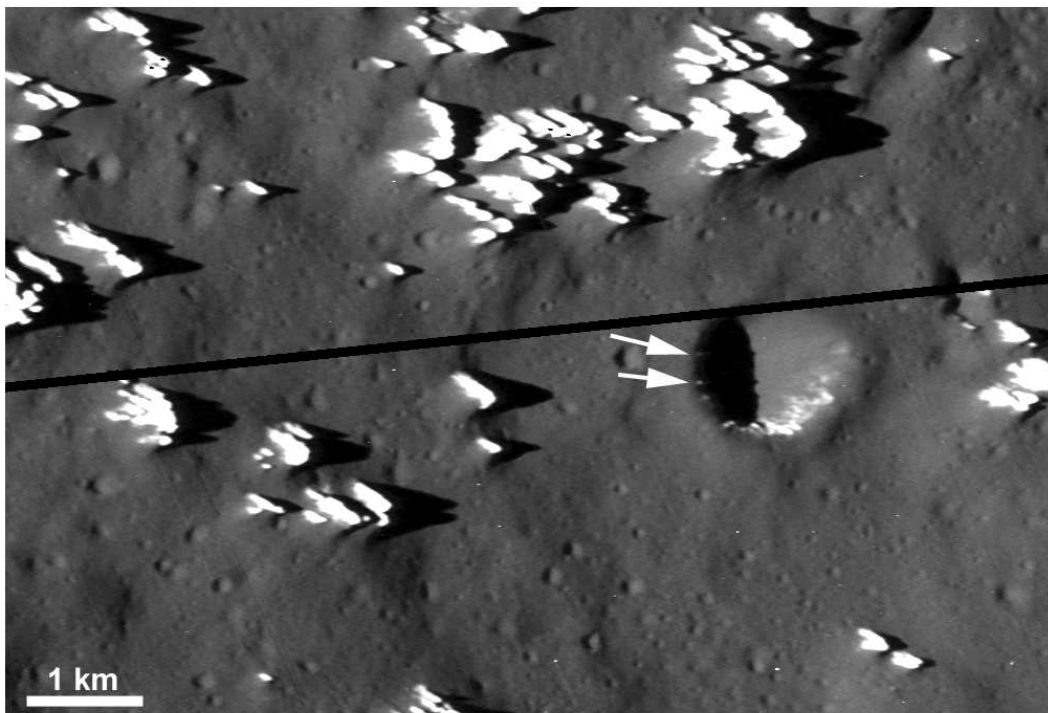
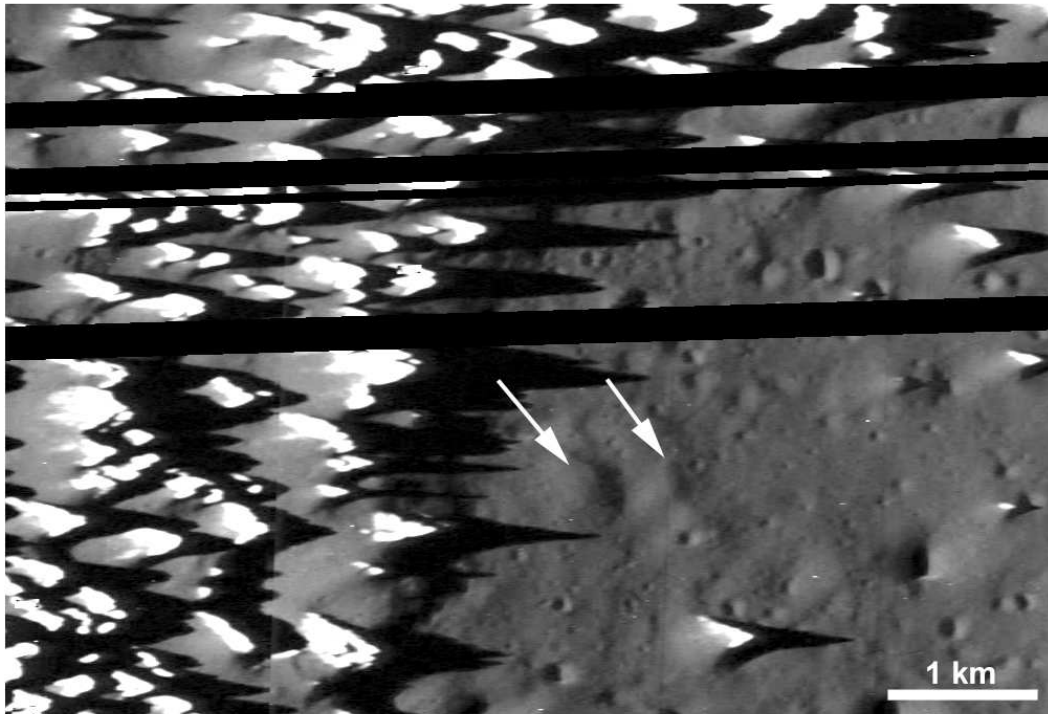
Target area: 30CSHIRES_01 (7 - 9 m/pxl)

Abbildung 8.68.: Detailansichten des Zielgebiets 30CSHIRES_01. Für dieses mit insgesamt vier Einzelaufnahmen (Auflösungen 4 m/pxl bis 9 m/pxl) abgedeckte Zielgebiet gibt es keinen niedriger aufgelösten geologischen Kontext. Oben: Ausschnitt des Bildes 30C0002 (7 m/pxl); unten: Ausschnitt des Bildes 30C0004 (9 m/pxl). Weitere Erläuterungen im Text.

topographisch höher und formt spitze, in der Form Haiﬁschzähnen ähnliche Massive. Aus Schattmessungen ergaben sich Höhen von bis zu 300 m, durchschnittliche Werte liegen zwischen 120 und 180 m. Einige der ursprünglichen Spitzen sind bereits so weit eingeebnet, dass nur noch relativ unscheinbare Buckel zurückgeblieben sind (Pfeile in 8.68, oben). Einige der Spitzen sind kreis- oder halbkreisförmig angeordnet und repräsentieren ehemalige Kraterränder.

In der linken Hälfte der oberen Detailaufnahme in Bild 8.68 sind die Massive dicht gepackt. Möglicherweise stellen sie Reste von Rand und Ejekta eines größeren Kraters dar, oder Reste eines alten Palimpsests. In einem weiteren Bild dieser Sequenz (Bildnummer 30C0003, aus Platzgründen nicht dargestellt) finden sich durchweg nur solche Massive. Da bei einem derart nahen Vorbeiflug der Sonde an Callisto, wie von anderen Zielgebiete her bekannt, auch eine relativ hohe Positionungenauigkeit der Kamera auftritt, ist anzunehmen, dass die tatsächlichen Zielgebiete der Sequenz 30CSHIRES.01 nicht genau dort liegen, wo Bild 8.65 sie zeigt, sondern möglicherweise einige Grad weiter südlich oder nördlich, vielleicht innerhalb des irregulär geformten Palimpsests (durch **P** in dieser Abbildung angegeben). Die in den vier Bildern aufgenommenen Bereiche würden eher zu dieser letzteren Lage passen.

Die am weitesten westlich gelegene Aufnahme der Sequenz (Bildnummer 30C0004, 9 m/pxl) "landete" in vorwiegend dunklem, leicht welligen Material mit wenigen Massiven oder Gruppen von Massiven und einer hohen Dichte kleiner Krater. Ein Ausschnitt dieser SSI-Aufnahme ist in Bild 8.68 (unten) gezeigt. Der mit etwa 1 km Durchmesser größte Krater ähnelt dem c_3 -Krater der C21-Sequenz (vergl. Bild 8.66 (c)). Wie dort zeichnet sich die beginnende Erosion und Abtragung in Form kleinerer Blöcke oder Massive ab, Härtlinge, die stehengeblieben sind (Pfeile in Abb. 8.68 (unten)), während der übrige Kraterrand bereits etwas abgetragen ist. Der Krater ist nicht kreisrund, sondern läuft nach Osten etwas spitz zu. Er entstand (a) entweder durch ein schräg auftreffendes Projektil aus westlicher Richtung oder (b) repräsentiert einen Sekundärkrater.

Helles Material kennzeichnet den oberen inneren Kraterrand, vermutlich anstehendes Eis ("*bed ice*"), oder ein Eis-Nichteis-Gemisch mit einem Frostüberzug. Der Kraterrand ist umgeben von kontinuierlichen Ejekta. Sie unterscheiden sich weder in Albedo noch morphologisch von der Umgebung und sind lediglich durch eine niedrigere Dichte der kleinen Krater bis zu einer Entfernung von 500 m bis maximal 1 km vom Kraterrand zu verfolgen.

Kumulative Häufigkeitsdiagramme von Messungen auf den Bilddaten der Aufnahmesequenz 30CSHIRES.01 sind in der Abbildung 8.69 dargestellt. Die am höchsten aufgelöste Aufnahme (4 m/pxl) (Bild 30C0001) eignet sich nicht zu Kraterzählungen. Die zahlreichen hellen Spitzen werfen lange Schatten, die das dunkle, glatte Material fast vollständig bedecken. Außerdem wurde diese Aufnahme unter besonders schrägem Blickwinkel aufgenommen.

Die in den dunklen, glatten Bereichen (Einheit $BVds$) der drei übrigen Bilder 30C0002 bis 30C0004 gemessenen Häufigkeiten sind wie in C21 durch eine steile Verteilung (kumulativer Verteilungsindex -3) gekennzeichnet. Im kumulativen Diagramm in Bild 8.69 (b) sind zwei Messungen aus C21 (blaue Punkte) und aus C30 (rote Punkte) miteinander verglichen. In den Häufigkeiten unterscheiden sich beide etwa um einen Faktor 1.5. Die Verteilungen sind in beiden Zielgebieten gleich steil bei Kratern unterhalb von 250 bis 300 Metern. Obwohl die Auflösung

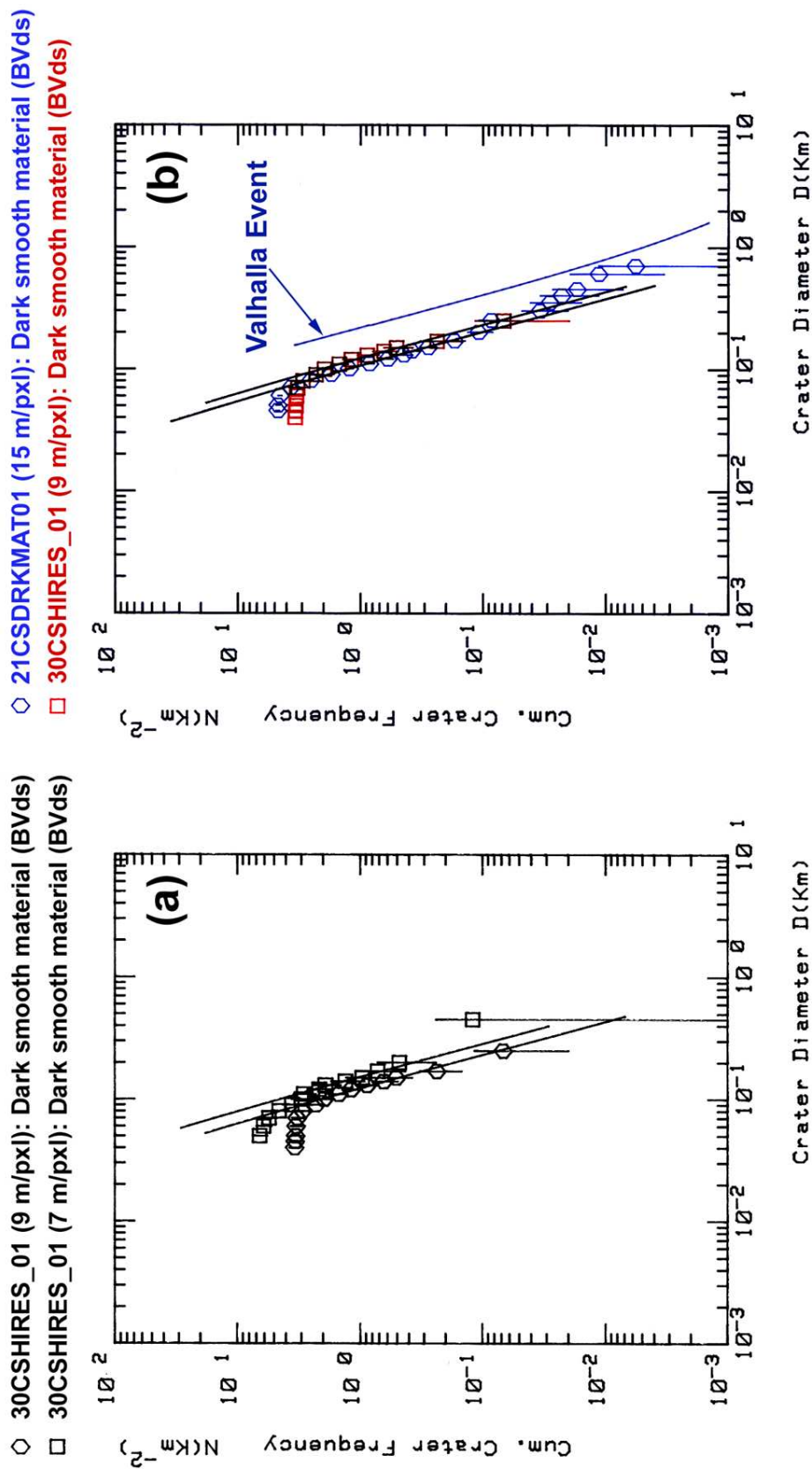


Abbildung 8.69.: Kumulative Häufigkeitsverteilungen des Zielgebiets 30CSHIRES_01. (a) Messungen im dunklen Gebiet (Einheit *dark smooth material*, BVds) in den Einzelbildern 30C0002 (7 m/pxl) und 30C0004 (9 m/pxl). (b) Vergleich zweier kumulativer Verteilung, gemessen in der Einheit BVds in den C21-Daten (blaue Punkte, Bildnummern 21C0001 bis 21C0004), und in den C30-Daten (gleiche Einheit, gezählt auf Bild 30C0004, rote Punkte). Die Isochrone des Valhalla-Events ist blau eingezeichnet. Weitere Erläuterungen im Text.

Geol. Einheit	N_{cum} ($D \geq 1$ km)	Model I [Ga]	Model IIa [Ga]	Model IIb [Ga]
$BVds^{(1)}$	$5.56 \cdot 10^{-4}$	3.55	0.29 (1.27, 0.06)	0.75 (1.91, 0.27)
$BVds^{(2)}$	$1.31 \cdot 10^{-3}$	3.74	0.66 (2.46, 0.14)	1.59 (3.3, 0.61)

Tabelle 8.8.: Kumulative Häufigkeiten und Modellalter des Zielgebiets 30CSHIRES_01. ⁽¹⁾Einheit $BVds$, gemessen in der Aufnahme mit 9 m/pxl, ⁽²⁾ $BVds$, gemessen in der Aufnahme mit 7 m/pxl Auflösung.

der C30-Daten (hier mit 9 m/pxl) gegenüber den C21-Daten mit 15 m/pxl höher ist, konnte dies bei der Kratermessung aber nicht voll ausgeschöpft werden. Die kumulative Verteilung in den C30-Daten biegt bereits früher von der steilen Verteilung ab als in den niedriger aufgelösten C21-Daten. Grund ist hierfür vermutlich der schräge Blickwinkel, unter dem das Zielgebiet 30CSHIRES_01 aufgenommen wurde.

Tabelle 8.8 listet zwei repräsentative Häufigkeiten und Modellalter der Einheit $BVds$ auf, gemessen jeweils in zwei der Bilddatensätze mit 9 m/pxl und 7 m/pxl Auflösung. Die Alter liegen in *Model I* mit etwa 3.6 - 3.7 Ga etwas höher als in den C21-Daten. Die höheren gemessenen Häufigkeiten könnten lokale Unterschiede wiedergeben, sind vermutlich aber auch bedingt durch die relativ kleinen Messflächen in den C30-Daten verglichen mit C21. Es fällt auf, dass das dunkle Material bei den kleinen Kratern in unterschiedlichen Gebieten ähnliche Modellalter aufweist. Es ist daher zu vermuten, dass nach dem Ende des LHB außer einer sehr langsam verlaufenden Erosion keine weiteren geologischen Aktivitäten stattgefunden haben und die Oberfläche seit mindestens 3.7 - 3.4 Ga keinen großen geologischen Veränderungen unterworfen war.

8.6.10. Farbdarstellungen der Kraterebenen

Farbdarstellungen der Jupiter abgewandten Hemisphäre in niedriger Auflösung (etwa 8 km/pxl, Bilddaten von Voyager-2) zeigen die Abbildungen 8.70 und 8.71. In der einfachen Falschfarbendarstellung aus den Filtern OR (rot, VI (grün) und UV (blau) sind trotz Verstärkung des Bild- und Farbkontrastes durch eine HSI-Transformation kaum Farbunterschiede feststellbar. Die stratigraphisch jungen Krater wie Burr, Bran oder Tornarsuk (in der Abbildung mit **Bu**, **Br** und **To** bezeichnet) reflektieren in allen drei Filtern gleich und sind mehr oder weniger weiß. Die Zentren der Becken (z. B. Asgard) und einiger Palimpseste sind hellbraun bis ockerfarben. Das dunkle Material der Kraterebenen erscheint einheitlich dunkelbraun.

Einzig, wenn auch sehr geringe Farbunterschiede sind zwischen Kratern der südlichen Hemisphäre und denen der Nordhemisphäre festzustellen: Bei den Kratern der Südhälfte sind die Ejekta leicht hellblau gefärbt. Ebenso deutet ein schwacher bläulicher Farbton in den ansonst braunen Kraterebenen der Südhälfte auf einen möglichen Material- und/oder Korngrößenunterschied zwischen beiden Hemisphären hin.

Dagegen liefert die Farbratiodarstellung aus diesen drei Filtern ein völlig anderes Bild. Setzt man die OR/UV-Ratio auf rot, die (umgekehrte) UV/OR-Ratio auf blau, und die OR/VI-Ratio auf grün, so ergibt sich eine deutliche Zweiteilung in der Farbe der Kraterebenen zwischen einer be-

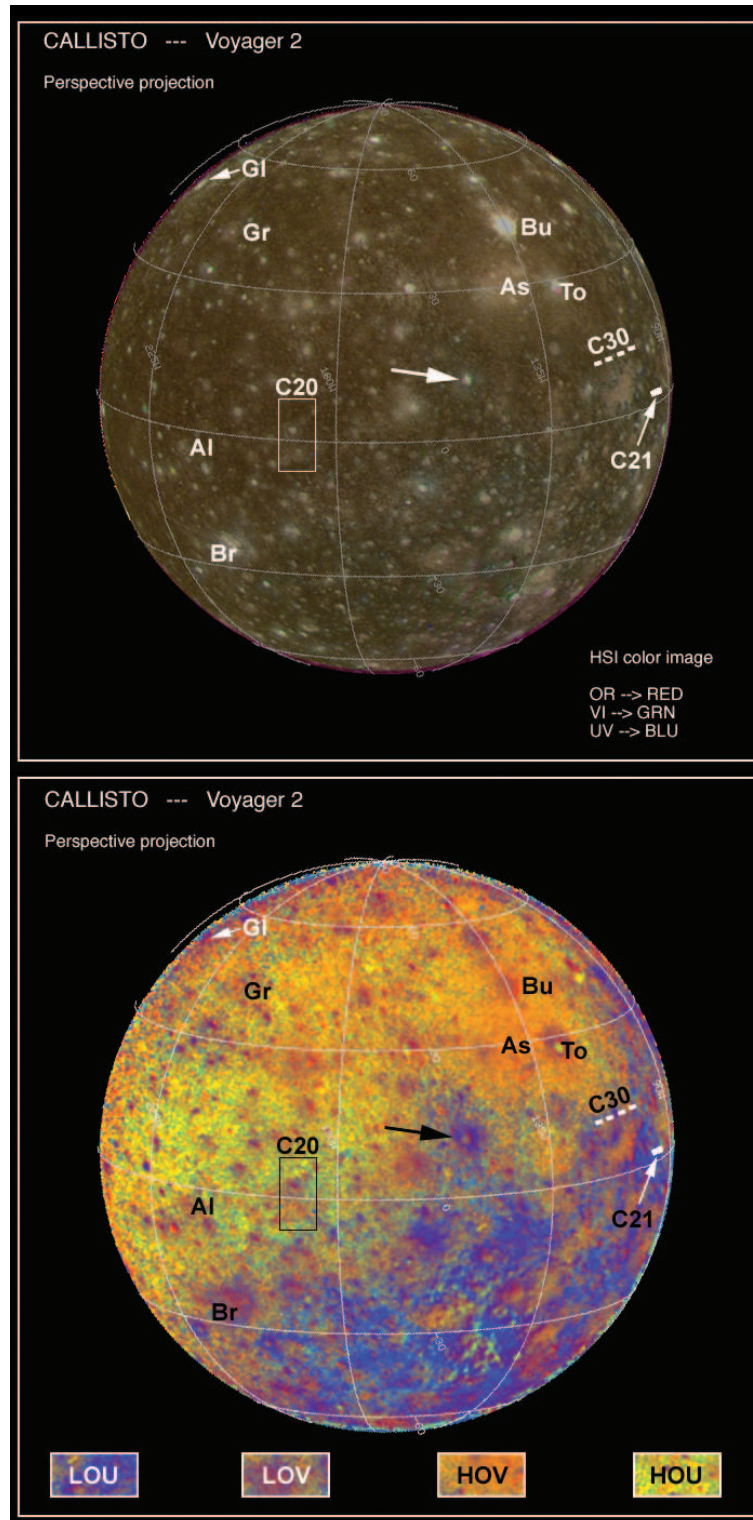


Abbildung 8.70.: Voyager-Farbdarstellungen der Callisto-Oberfläche. Oben: Falschfarbenkomposite aus den Voyager-2-Bildern 842J2-003 (OR-Filter, rot), 838J2-003 (VI-Filter, grün), und 846J2-003 (UV-Filter, blau). Oben: HSI-Darstellung, Intensitätskomponenten vor Rücktransformation in RGB gefiltert; unten: Farbratiodarstellung mit OR/UV auf rot, OR/VI auf grün, und UV/OR auf blau. Die vier spektralen Haupteinheiten sind angegeben. Namensbezeichnungen: As: Asgard, Al: Alfr, Br: Bran, Bu: Burr, Gl: Gloi, Gr: Grimr, To: Tornarsuk; die Lage einiger während der Orbits C20, C21 und C30 aufgenommenen Gebiete (soweit hier erwähnt) sind eingezeichnet.

vorzugt hellbraunen, orangen bis grünlich-gelben nördlichen Hemisphäre und einer blau-violetten südlicheren Hemisphäre. Die Grenze zwischen beiden Einheiten ist nicht scharf. Der Übergang vollzieht sich graduell etwa entlang einer NW-SE bis WNW-ESE verlaufenden Linie bzw. einem Großkreis (auch wenn der Einfachheit halber von einer Nord- und Südhälfte gesprochen wird).

In der Ratiodarstellung sind wenigstens vier Farbeinheiten zu unterscheiden. Die beiden durch hohe ($HOU = high\ OR/UV$) und niedrige ($LOU = low\ OR/UV$) OR/UV-Verhältnisse gekennzeichneten Einheiten bestimmen die spektrale Zweiteilung in eine Nord- und eine Südhälfte. Zwei weitere Einheiten sind meist an Impaktstrukturen gebunden: eine Einheit mit einem relativ niedrigen OR/VI-Verhältnis (LOV) kennzeichnet Krater wie Bran, Burr oder Tornarsuk. Eine weitere mit relativ hohem OR/VI-Verhältnis (HOV) kommt bevorzugt in den Zentren der Multiringbecken (Asgard) oder in Palimpsesten vor.

In der Schwarzweiß-Darstellung der OR/UV-Ratio (Bild 8.71, oben) fällt auf, dass die Nordhälfte fast einheitlich hell ist. Lediglich einige Krater heben sich hier als geringfügig dunklere Flecken heraus (beispielsweise Burr und Tornarsuk). Dies gilt auch für die OR/VI-Ratio (Bild 8.71, unten). Die OR/VI-Ratio erscheint in der Nordhälfte "fleckiger", verursacht durch zahlreiche kleinere Krater (dunkle Punkte), die in der OR/UV-Ratio nicht bzw. kaum zu unterscheiden sind. Nur ein einziger Krater hebt sich in beiden Ratios als dunkle Einheit vor einem helleren Hintergrund ab (angezeigt durch einen Pfeil in Bild 8.70 und 8.71). Die gleiche Zonierung in eine (annähernde) Nord- und Südhälfte ist aus der OR/VI-Ratio ersichtlich, allerdings ist der Helligkeitsunterschied nicht so augenfällig wie in der OR/UV-Ratio.

Fast die gesamte Nordhälfte absorbiert durchweg stärker sowohl im violetten wie im ultravioletten Bereich. *Denk et al.* (1998b, 1999c) fanden durch Untersuchungen mittels SSI-Farbdaten ein stark im violetten Bereich absorbierendes Material (*violet absorber*) in den Kraterebenen, das spektral den D-Typ-Asteroiden ähnelt, damit vermutlich impakt-implantiert ist (ebd.). In der vorliegenden Farbratiodarstellung entspricht dieses Material weitgehend den Einheiten HOU bis HOV und charakterisiert im wesentlichen die Nordhälfte der abgebildeten Callisto-Hemisphäre.

Das in der Südhälfte stark im UV reflektierende Material erstreckt sich im Bereich östlich des Asgard-Beckens bis in die Nordhälfte. Analog wiesen *Denk et al.* (1999c) in den SSI-Daten im gleichen Gebiet, d. h. zwischen Asgard und Valhalla, ebenfalls ein im violetten stärker reflektierendes Material nach, während das Gebiet östlich von Valhalla wieder durch den *violet absorber* geprägt ist.

Eine spektrale Asymmetrie im OR/UV- wie im OR/VI-Verhältnis in Bezug auf Apex und Antapex lässt sich allein aus der Lage der beiden spektralen Einheiten mit Sicherheit ausschließen. Die beiden Einheiten sind somit nicht durch Prozesse entstanden, die stärker am Apex als am Antapex der Bahnbewegung wirken. Die spektrale Dichotomie im Ultravioletten könnte folgende Ursachen haben:

1. Es könnte sich um einen durchgreifenden, durch endogene Prozesse bedingten Materialunterschied in den oberen Krustenbereichen zwischen der Nord- und Südhälfte handeln. Da deutliche Anzeichen endogener Aktivität fehlen, ist zu vermuten, dass ein sehr großer Einschlag in der Frühzeit (d. h. vor weit mehr als 4 Milliarden) diese Materialtrennung

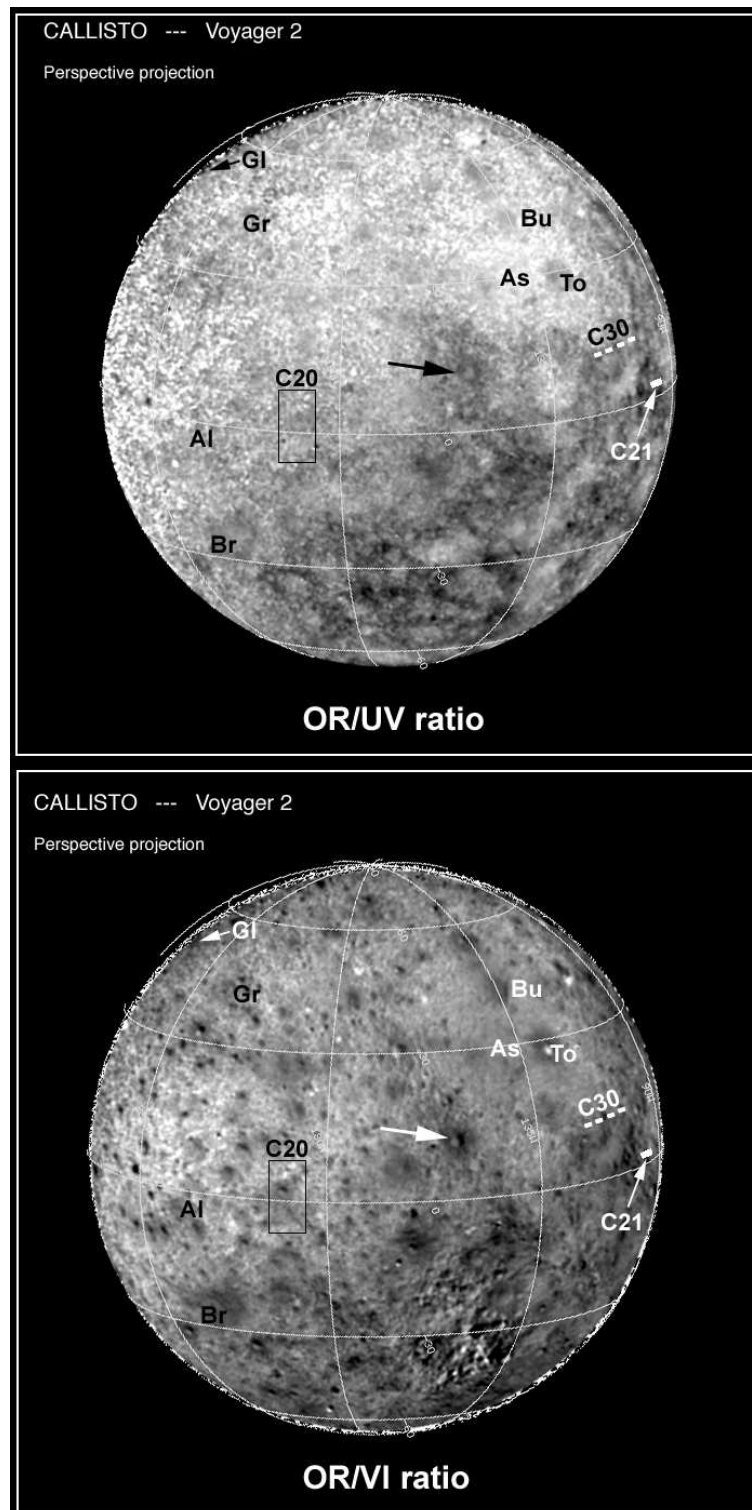


Abbildung 8.71.: Voyager-Farbratiodarstellungen der Callisto-Oberfläche. Oben: OR/UV-Ratio; unten: OR/VI-Ratio. Bildnummern siehe Abbildung 8.70.

verursacht haben könnte. Allerdings ist hier festzuhalten, dass die Farbeinheiten nicht dem originären, durch den Impakt verteilten Material entsprechen, sondern dessen Rückstand durch Sublimationsverwitterung, der, wie im vorangegangenen Abschnitt 8.6.9 dargelegt, auf Callisto überall vorhanden ist. Unterschiedliches Ausgangsmaterial in den beiden Hemisphären hatte somit die Entstehung eines spektral sich unterschiedlich verhaltenden Rückstandes zur Folge.

2. Eine exogene Entstehung bietet sich als Alternative an. Material der stark im Violetten absorbierenden Einheit *HOV* dürfte größeren Tiefen entstammen, da es in den Zentren der Multiringbecken und Palimpseste angereichert ist. Wassereis, vermischt mit Nicht-Eismaterial, etwa Schichtsilikate (Serpentin) oder auch Evaporite dürfte hier vorherrschend sein (Calvin und Clark, 1991; McCord et al., 1997, 1998; Denk et al., 1998b, 1999c; Greeley et al., 2000b). Dagegen ist das vermutlich mehr eishaltige Material der Einheiten *LOU* und *LOV* bis in nicht allzu große Tiefe anzutreffen, da es in der Nordhälfte durch zahlreiche Impakte (z. B. Bran (BR), Burr (Bu), Tornarsuk (To), und zahlreiche kleinere Krater) an der Oberfläche verteilt wurde. Besonders hebt sich hier der in Bild 8.70 (unten) durch einen Pfeil markierte (namenlose) Krater hervor. Auch für diese alternative Erklärung gilt, dass die spektrale Differenzierung durch einen Rückstand aus Sublimationsverwitterung, verursacht ist, der sich aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien aus unterschiedlichen Tiefen gebildet hat.

Mit den derzeit vorliegenden Voyager- und SSI-Bilddaten lässt sich nicht klären, ob zwischen den beiden spektral unterschiedlichen Hälften Altersunterschiede bestehen. Daten der C20-Zielgebiete liegen innerhalb der Einheit *HOU*. Die hoch aufgelösten Daten der C21- und C30-Zielgebiete liegen zwar innerhalb der "blauen" Einheit *LOU*, allerdings existiert hierfür kein geologischer Kontext. Es konnte nur das mutmaßliche Alter des dunklen Verwitterungsrückstandes datiert werden (siehe vorangehenden Abschnitt 8.6.9). In jedem Fall sind neue Bild- und Spektrometerdaten zukünftiger Jupiter-Missionen erforderlich, die einen weiten Wellenlängenbereich vom Ultraviolett bis zum Nahen Infrarot abdecken, um die globalen Unterschiede im Spektralverhalten genauer zu untersuchen.

8.6.11. Tektonische Aktivität auf Callisto und der Zusammenhang zwischen tektonischer Deformation und Erosion

8.6.11.1. Hauptrichtungen von Lineamenten und Bruchstrukturen

Ein Blick auf Callisto bei mittleren bis niedrigen Bildauflösungen ($> \approx 2$ km/pxl) zeigt, dass sich seine Oberfläche - die großen Multiringbecken ausgenommen - nicht gerade durch tektonischen Formenreichtum auszeichnet, ganz im Gegensatz zu seinen beiden inneren Nachbarn Ganymed oder Europa (vergl. Bild 5.1, Abschnitt 5.3). Bei genauer Betrachtung ist in den dunklen Krater Ebenen auf Callisto aber ein Netzwerk von Albedolineamenten unterschiedlicher Richtungen erkennbar. Darunter fallen (a) kreisförmige Lineamente, die zu alten Ringstrukturen gehören, und (b) parallele Lineamente mit mehreren Vorzugsrichtungen (Wagner und Neukum, 1991,

1994b; Schenk, 1995). Vereinzelt (c) wurden auch radiale Lineamente nachgewiesen, die von einem Punkt ausgehen (Schenk, 1995).

Richtungsanalysen von Lineament- oder Bruchsystemen wurden in der Vergangenheit nur in geringem Umfang durchgeführt. Thomas und Masson (1985) beschränkten sich auf tektonische Formen innerhalb von Valhalla. In ihrer Lineamentstatistik finden sich bevorzugt Hauptrichtungen mit 50° (annähernd NE-SW) und 150° (etwa NW-SE). Sie interpretierten diese Richtungen als Teil eines so genannten "globalen Netzes" (*global grid*), das z. B. auch für den Erdmond postuliert wurde (Strom, 1964). Allerdings wurde die Existenz globaler Lineamentsysteme vielfach angezweifelt und auf Artefakte zurückgeführt, die durch eine Kombination aus tatsächlichen Oberflächenstrukturen, Beleuchtungsbedingungen und mangelnder Bildauflösung und/oder -qualität zustande kamen (Wilhelms, 1993).

Wagner und Neukum (1991) kartierten Albedolineamente in den äquatorialen und mittleren Breiten, abgedeckt durch die Kartenblätter *Jc-9* (*Valfödr Quadr.*) und *Jc-10* (*Vali Quadr.*) und Teilen ihrer unmittelbar nördlich und südlich anschließenden *quadrangles* (*Jc-4 - 6*, *Jc-8*, und *Jc-13/14*; zu den Namen und geographischen Positionen der Kartenblätter siehe Tabelle A.1 in Anhang A). Diese Gebiete wurden von Voyager-1 (*Jc - 10*) und Voyager-2 (*Jc - 9*) mit 2.0 bzw. 1.7 km/pxl aufgenommen.

Wagner und Neukum (1991) fanden von Thomas und Masson (1985) abweichende Hauptrichtungen, die im Rosendiagramm um $10 - 20^\circ$ im Uhrzeigersinn gedreht sind. Die beiden Hauptrichtungen liegen hier bei $60 - 70^\circ$ und 160° , repräsentieren aber ebenfalls ein orthogonales Lineamentsystem. Möglicherweise wurden die Resultate von Thomas und Masson (1985) dadurch beeinflusst, dass sie nicht kartenprojizierte Bilddaten zu ihren Analysen verwendeten und ihre Richtungen daher Ungenauigkeiten aufweisen könnten. Wagner und Neukum (1991) fanden zwei weitere Richtungen bei etwa 10° und bei 110° . In den beiden von Voyager-1 und -2 gemessenen Gebieten kam die Sonne jeweils aus unterschiedlichen Richtungen (Voyager-1: von Westen; Voyager-2: von Osten). Dennoch ist die Übereinstimmung in den Richtungen zwischen beiden Gebieten bemerkenswert.

Kritisch ist anzumerken, dass Wagner und Neukum (1991) das Lineamentsystem möglicherweise zu dicht kartierten und die Zahl der Lineamente wesentlich geringer ist. Zumindest Lineamente mit NE-SW-Richtung wurden unabhängig auch von Schenk (1995) erkannt. Vermutlich erfassten Wagner und Neukum (1991) zum Teil auch solche Lineamente, die zu alten Multiringstrukturen gehören, besonders dann, wenn diese nur noch in Ringbögen nachzuweisen waren, die höchstens einen Viertelkreis umfassten.

Geht man von der Ansicht von Wilhelms (1993) aus, müssten Lineamente, die in niedriger aufgelösten Daten (wie bei Voyager) zu sehen sind, als vermeintliche Artefakte letztendlich auf höher aufgelösten Daten verschwinden. Die SSI-Daten boten somit die Chance, (1) die Existenz dieser Formen wirklich nachzuweisen, (2) die vorherrschenden Richtungen in SSI- und Voyager-Daten zu überprüfen, und (3) den Zusammenhang zwischen Lineamenten und tektonischen Formen in den unterschiedlich aufgelösten Bilddatensätzen herzustellen.

Drei Testregionen wurden dazu ausgewählt, die innerhalb der von Wagner und Neukum (1991) beschriebenen Messgebiete liegen (Wagner et al., 2001): (a) die so genannten *smooth plains* (Ben-

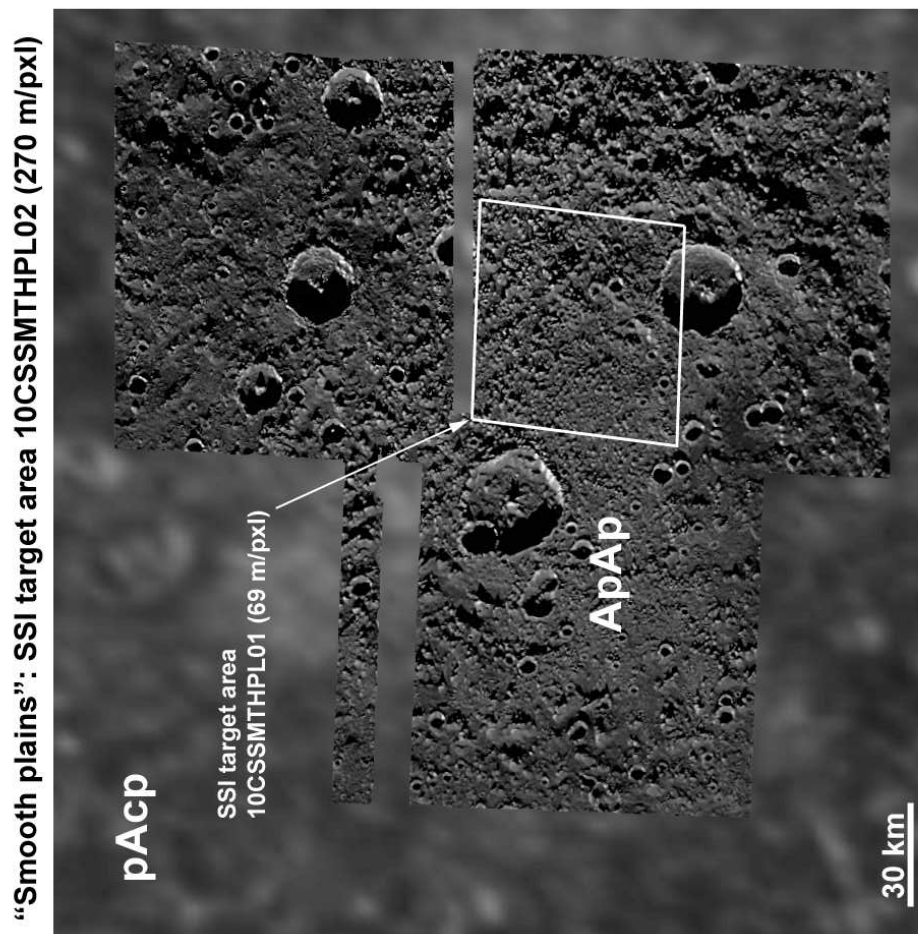
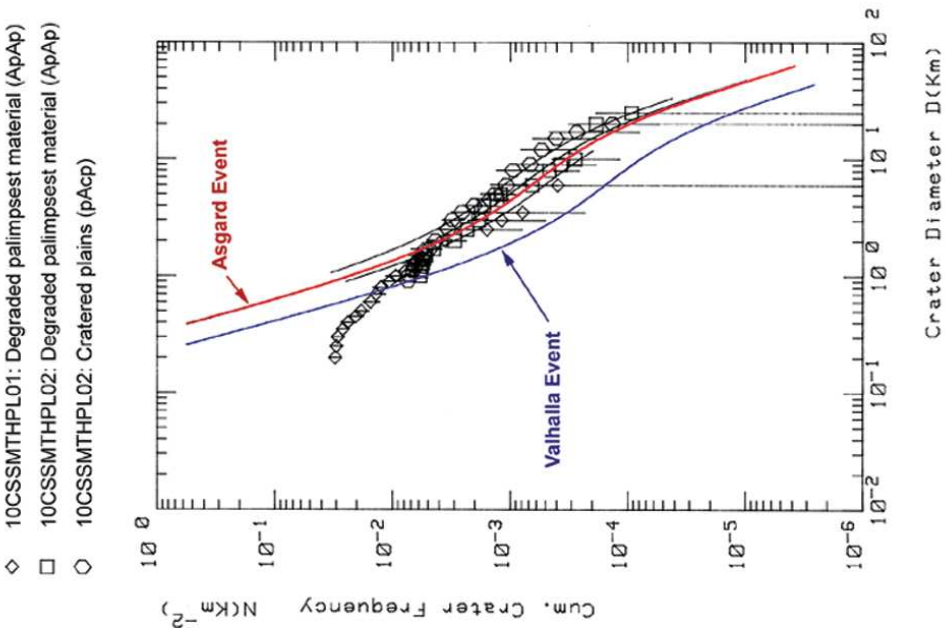


Abbildung 8.72.: Detailaufnahme der *smooth plains* (SSI-Zielgebiet 10CSSMTHPL02) in Voyager-Kontext. Mosaik aus drei SSI-Bildern (10C0026 - 28, Bildauflösung 270 m/pxl; Lage des Zielgebiets 10CSSMTHPL01 (68 m/pxl) ist eingezeichnet; **pAcp**: dunkle, (prä-Asgardische) Kratererebenen, (**ApA**)p: abgetragenes Palimpsest. Kumulative Häufigkeiten der Einheit *pAcp* (gemessen in 10CSSMTHPL02) und der Einheit *ApAp* (gemessen in beiden Zielgebieten).

der *et al.*, 1997b) mit den beiden Zielgebieten 10CSSMTHPL01 und 02, (b) das Gebiet zwischen den beiden benachbarten Kratern Har und Tindr (Zielgebiete C9CSHAR_01 und 10CSTINDR_01), und (c) die bereits an anderer Stelle (siehe Abschnitt 8.5.5) beschriebenen *dark flows* (Zielgebiete 20CSDRKFLO01 und 02). Die Lage dieser Gebiete zeigt Abb. 5.5 (Abschnitt 5.4.3).

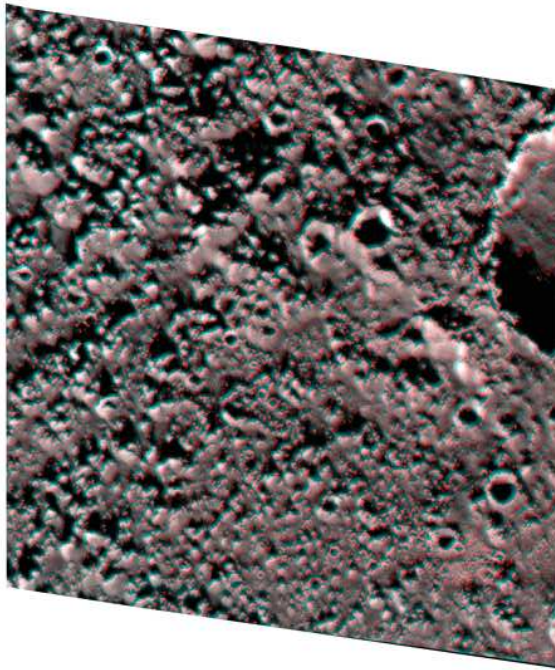
Bild 8.72 (links) zeigt eine Übersicht des Zielgebiets 10CSSMTHPL02 im Voyager-Kontext und die kumulativen Häufigkeiten der geologischen Einheiten. Die SSI-Bildauflösung beträgt 270 m/pxl. In den Voyager-Daten findet sich an dieser Stelle eine helle, etwa hantelförmige, weitgehend glatte Einheit mit ≈ 200 km (etwa in Ost-West-Richtung) auf 100 km (Nord-Süd) Ausdehnung inmitten dunkler Kraterebenen. Zwei Interpretationen wurden angeboten: *Bender et al.* (1997b) sahen in dieser Einheit einen Beweis für kryovulkanische Prozesse und glaubten, es sei helles, eisreiches Material an der Oberfläche ausgeflossen. *Schenk* (1995) vermutete dagegen eine palimpsest-ähnliche Impaktstruktur. Der unregelmäßige Umriss lässt nicht von vornherein auf ein Palimpsest schließen. Vergleiche mit ähnlichen hellen Flecken auf niedrig aufgelösten Voyager-Daten unterstützen die Interpretation als Impaktform, obwohl ringförmige Strukturen hier weitgehend fehlen. Möglicherweise handelt es sich nicht um ein einzelnes, sondern mindestens um zwei eng nebeneinander befindliche, annähernd gleich große Palimpseste, die zur gleichen Zeit entstanden sein könnten.

Die bei relativ niedrigem Sonnenstand aufgenommenen SSI-Daten (Einfallswinkel 84°) enthüllten eine in keiner Weise glatte, sondern stattdessen sehr rauhe Oberfläche mit Kuppen und Massiven, oder Gruppen von Massiven (*Greeley et al.*, 2000b). Das Gebiet ähnelt dem Zielgebiet 20CSDRKFLO01/02, in dem ebenfalls ein abgetragenes Palimpsest identifiziert wurde (vergl. Abschnitt 8.5.5). Wegen der tief stehenden Sonne kommt der Helligkeitsunterschied zwischen den dunklen Kraterebenen und den hellen "Ebenen" nur gering zum Tragen, so dass die genaue Abgrenzung beider Einheiten schwer fällt.

Abb. 8.72 (rechts) zeigt die kumulativen Häufigkeiten der Kraterebenen und des Palimpsests. In den Kraterebenen wurden prä-Asgardische Häufigkeiten gemessen. Das Alter des hellen Palimpsests schwankt zwischen Asgardisch (in 10CSSMTHPL01) und prä-Asgardisch (10CSSMTHPL02); letztere Messung ist wegen der Streuung der Messpunkte schwer zu fitten. Die kumulativen Häufigkeiten und Modellalter sind in Tabelle 8.9 gelistet. Bemerkenswert ist, dass die durch Erosion bedingte Verflachung der kumulativen Verteilung beim jüngeren Palimpsest erst etwa bei einem Durchmesser von 1 km einsetzt, bei den älteren Kraterebenen bereits bei ≈ 2 km. Dies belegt, dass mit der Zeit mehr und mehr Krater mit größeren Durchmessern von Erosion und Abtragung erfasst wurden.

Aus den Datensätzen der beiden Zielgebiete 10CSSMTHPL01 und 10CSSMTHPL02 konnte ein Anaglyphenbild erstellt werden. Das Ergebnis zeigt Abb. 8.73. Die Stereodarstellung hebt ein System von Klüften und Brüchen hervor, die mit Hauptrichtungen von ENE-WSW (ca. 60°) und NNW-SSE (160°) verlaufen (*Wagner et al.*, 2001). Die Strukturkarte in Bild 8.73 veranschaulicht die Richtungsverteilung des Kluftsystems. Entlang einzelner Klüfte oder Brüche kam es offenbar zu vertikalen Bewegungen. Die Massive im nordöstlichen Bereich des Gebiets erscheinen generell höher als im südwestlichen und könnten relativ zueinander gehoben bzw. gesenkt worden sein. Eine besonders auffallende, ENE-WSW durch fast das ganze Bild verlaufende Kluft (dicke Linie in der Strukturkarte, Abb. 8.73) ist vermutlich der Ausbiss einer Störungslin-

CALLISTO: 10CSSMTHPL01+02 anaglyph image



10 km

Structural map

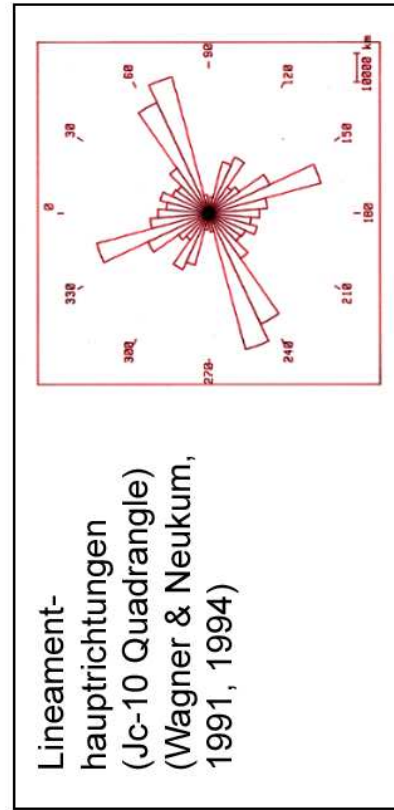
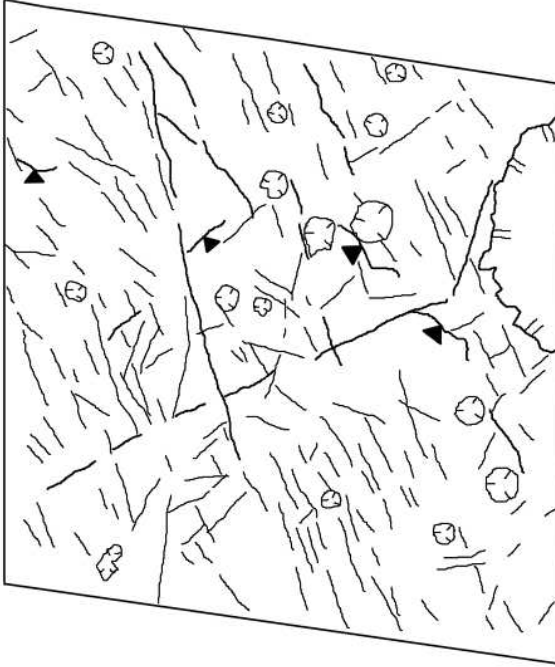


Abbildung 8.73.: Anaglyphendarstellung und Strukturkarte der *smooth plains* (Zielgebiete 10CSSMTHPL01/02). Hauptlineamente oder -klüfte mit dicker Signatur; Kreissignatur: Krater; Linien mit gefüllten Dreiecken: Steilhänge (abfallend auf der Seite des Dreiecks); Lineament-Richtungrose (Gesamtlänge der Lineamente in Kilometer) nach Wagner und Neukum (1991, 1994b).

Region	N_{cum} ($D \geq 1$ km)	Model I [Ga]	Model IIa [Ga]	Model IIb [Ga]
$(ApA)p^{(1)}$	$1.74 \cdot 10^{-2}$	4.15	3.98 (4.56, 1.54)	4.54 (4.56, 3.87)
$(ApA)p^{(2)}$	$2.74 \cdot 10^{-2}$	4.22	4.38 (4.56, 2.17)	4.56 (4.56, 4.33)
$pAcp^{(2)}$	$3.83 \cdot 10^{-2}$	4.27	4.51 (4.56, 2.71)	4.56 (4.56, 4.49)

Tabelle 8.9.: Kumulative Häufigkeiten und Modellalter der Zielgebiete 10CSSMTHPL01 und 10CSSMTHPL02. Kumulative Häufigkeiten für Krater größer/gleich 1 km Durchmesser. Einheiten $(ApA)p$ (Palimpsest) und $pAcp$ (Kratererebenen) gemessen in den Daten von $^{(1)}$ 10CSSMTHPL01 und $^{(2)}$ 10CSSMTHPL02.

nie, entlang der das Gelände südlich der Kluft relativ zur nördlichen Scholle gehoben erscheint. An einigen Stellen finden sich außerdem Steilhänge (Liniensignatur mit gefüllten Dreiecken in Bild 8.73). Ein NE-SW-verlaufender Hang repräsentiert möglicherweise eine Abschiebung: Das Gelände südöstlich mit einem etwa 25 km großen Krater (dessen größter Teil sich außerhalb des Zielgebiets 10CSSMTHPL01 befindet) liegt höher als das Gelände nordwestlich des Steilhangs.

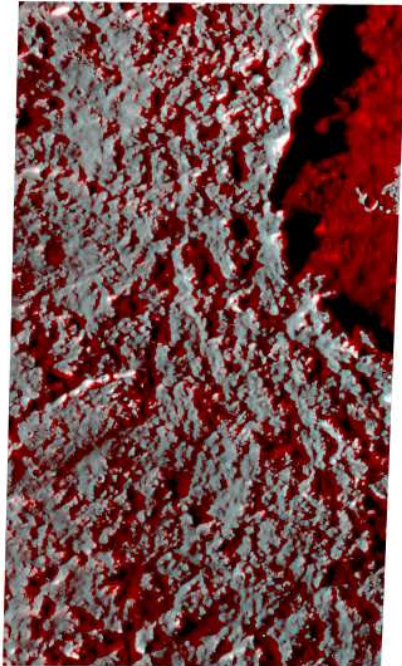
Dass in dem in Abb. 8.73 gezeigten Gebiet vertikale Tektonik entlang von Klüften oder Brüchen gewirkt hat, ist damit eindeutig. Ob das Gebiet gegenüber anderen auf der Callisto-Oberfläche repräsentativ ist oder eine Ausnahme darstellt, ist dagegen nicht sicher, da eine umfassende Abdeckung mit Stereodaten in diesem Auflösungsbereich fehlt.

Die Übereinstimmung zwischen den Haupttrichtungen in den SSI-Daten mit den Richtungen, die in den älteren Voyagerdaten von *Wagner und Neukum* (1991 und 1994b) kartiert und statistisch erfasst wurden, ist verblüffend. Alle drei Haupttrichtungen der Voyager-Auswertung sind in den SSI-Daten ebenfalls nachzuweisen (*Wagner et al.*, 2001), wie der Vergleich mit der Richtungsrose in Bild 8.73 darlegt. Damit ist der Nachweis erbracht, dass ein in niedriger aufgelösten Bilddaten erfasstes Lineamentsystem nicht notwendigerweise auf Artefakten beruht, sondern in Daten höherer Auflösung wiederzufinden ist und damit auf realen tektonischen Phänomenen begründet ist.

Ebenfalls innerhalb der Kartier- und Messgebiete von *Wagner und Neukum* (1991, 1994b) liegen die beiden Krater Har und Tindr (siehe Abschnitt 8.5.6). Im Überlappungsbereich zwischen den beiden Zielgebieten C9CSHAR_01 und 10CSTINDR_01 lässt sich eine Anaglyphendarstellung herstellen, die Bild 8.74 zeigt. Die gleichen Richtungen sind in diesem etwa 600 km von den *smooth plains* entfernten Gebiet nachzuweisen, wie die Strukturkarte verdeutlicht.

Eine weitere Anaglyphendarstellung gelang in den bereits an anderer Stelle diskutierten Zielgebieten 20CSDRKFLO01 und 20CSDRKFLO02 (*dark flows*, vergl. Abschnitt 8.5.5; Abbildungen 8.44 und 8.45). Das Ergebnis zeigt Bild 8.75. Der Stereoeindruck ist hier geringer als in den *smooth plains*. Die Bildauflösung der beiden Stereopartner ist nur etwa halb so groß (108 m/pxl und 430 m/pxl). Das Anaglyphenbild umfasst einen Teil eines abgetragenen Palimpsests und dunkle, glatte Ebenen (die so genannten *dark "flows"*). Beide Einheiten sind laut Kraterdatierungen Asgardischen Alters, die umgebenden Kratererebenen prä-Asgardisch (vergl. Abschnitt 8.5.5).

Crater Tindr: southwestern rim
Anaglyph image



Structural map

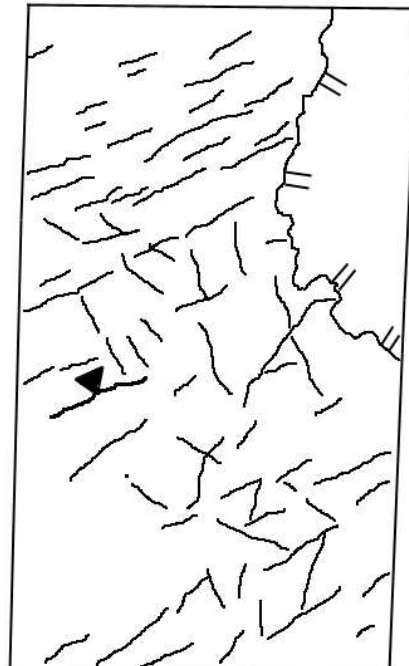


Abbildung 8.74.: Anaglyphendarstellung und Strukturkarte der Krater Har und Tindr. (SSI-Zielgebiete C9CSHAR_01 und 10CSTINDR_01). Die Lage des Ausschnitts zwischen den beiden Kratern geht aus Abb. 8.46 (Abschnitt 8.5.6) hervor.

Die Strukturkarte des Gebiets zeigt wiederum zwei orthogonale Hauptrichtungen: etwa NE-SW und NW-SE. Ein auffallender heller Bergrücken mit nach Nordosten abfallenden, im Schatten liegenden Steilhängen (gefüllte Dreiecke in Abb. 8.75) ist wahrscheinlich Teil der Ringstruktur, die dieses abgetragene Palimpsest auszeichnet. Das Gelände nordöstlich des Rings ist auf einer Breite von etwa 20 - 25 km abgesenkt und hebt sich wieder auf das ursprüngliche Niveau entlang eines weiteren, sehr viel schwächeren Rings.

Die Richtungen stimmen innerhalb von etwa 10° überein mit denen, die *Wagner und Neukum* (1991, 1994b) im Gebiet des Kartenblatts *Jc-9* feststellten. Die Zielgebiete 20CSDRKFLO01/02 liegen allerdings etwas weiter östlich. In der Strukturkarte ist neben den beiden Hauptrichtungen noch eine weitere bei etwa 120° zu finden, die in der Richtungsrose nicht vertreten ist, somit hier lokal auftreten könnte. Ein weiteres Maximum bei etwa 20° in der Richtungsrose ist dagegen in der Strukturkarte des SSI-Zielgebiets mit etwa NNE-SSW wieder nachzuweisen.

Die hier beschriebenen Hauptrichtungen sind an weiteren Stellen der Callisto-Oberfläche wiederzufinden, teilweise auf niedriger aufgelösten Voyager-Daten, zum Teil auch in sehr hoch aufgelösten SSI-Daten. Zum Beispiel finden sich Albedolineamente mit einer ENE-WSW-Richtung im Zielgebiet C3CSVALGRB01 (vergl. Bild 8.24, Abschnitt 8.4.6). Lineamente mit NE-SW-

Richtungen sind im Gebiet des Asgardbeckens zu finden (vergl. Abb. 8.34, 8.35 und 8.36, Abschnitt 8.5.2). Richtungen mit NE-SW bis ENE-WSW und NNE-SSW, ähnlich denen im Zielgebiet der *dark "flows"*, zeigt Bild 8.61 (Abschnitt 8.6.8.1) aus dem Zielgebiet 20CSCRSTAT02.

An anderen Stellen dagegen sind Lineamente nicht oder nicht in dem auffallenden Maß wie in den vorangehend beschriebenen Gebieten nachzuweisen. Lokalitäten mit wenigen Lineamenten sind beispielsweise das G8-Zielgebiet G8CSSPOLAR01 oder das C9-Zielgebiet C9CSCRATER01 (Bild 8.63, Abschnitt 8.6.8). Letzteres liegt aber innerhalb des von *Wagner und Neukum* (1991) kartierten Bereichs. Eine mögliche Ursache für die eingeschränkte Erkennbarkeit der Lineamente könnte die Beleuchtungsgeometrie sein. Der Sonnenstand in C9CSCRATER01 ist relativ hoch. Eine weitere Ursache liegt vermutlich in der lokal größeren Mächtigkeit des dunklen Materials. Dadurch wird das *"bed ice"* der oberen Kruste, das im anstehenden Zustand, wie die obigen Abbildungen 8.73 bis 8.75 verdeutlichen, tektonische Struktur gut erkennen lässt, weitgehend überdeckt.

8.6.11.2. Stressursachen

Squyres und Croft (1986) unterteilten mögliche Stressursachen in den Krusten von Eissatelliten in vier Gruppen⁸²:

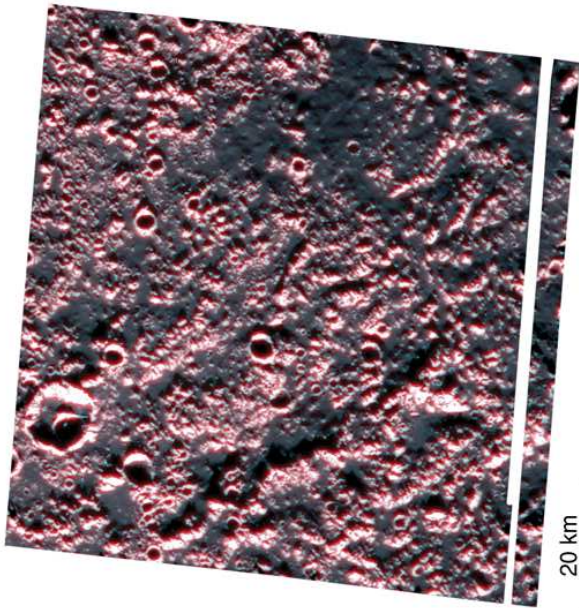
1. Volumenänderungen des Satellitenkörpers,
2. Konvektionsbewegungen,
3. Gezeiteneinflüsse,
4. und Impakte.

Ursachen für Volumenänderungen der Eissatelliten sind beispielsweise Differentiationsprozesse. Radionuklide im Silikatanteil könnten genügend Wärme geliefert haben, um Wassereis teilweise oder vollkommen aufzuschmelzen (*Schubert et al.*, 1981, 1986). Die schwereren Silikate sinken ab, ebenso reichern sich Hochdruck- und Hochtemperatur-Eisphasen wie Eis VII oder VIII im Inneren an, in der äußeren Schale dagegen Eis I (vergl. Abb. 5.11, Abschnitt 5.8.2). Diese Differentiationsprozesse könnten aber so früh abgelaufen sein, dass ihre tektonische Ausprägung an den Oberflächen nicht mehr überliefert ist (*Squyres und Croft*, 1986).

Eine weitere Ursache für Volumenänderungen könnte das Ausfrieren einer flüssigen Wasserschicht sein (*Squyres und Croft*, 1986, und Zitate darin). Magnetometermessungen von Galileo zeigen aber, dass in allen drei Galileischen Eissatelliten in einiger Tiefe (bei Callisto etwa 200 km und tiefer) rezent noch ein Wasserozean vorhanden sein könnte (*Khurana et al.*, 1998; *Neubauer*, 1998; *Kivelson et al.*, 1999; *Zimmer et al.*, 2000). *Spohn und Schubert* (2003) diskutierten die Möglichkeit, dass das Ausfrieren eines Wasserozeans in Ganymed und Callisto durch Radionuklide in ihren Gesteinsanteilen verhindert wird. Zusätzliche Bestandteile wie Ammoniumhydrate oder Mineralsalze könnten den Schmelzpunkt des flüssigen Materials weiter senken und ein Ausfrieren unterbinden (*Kargel*, 1992; *Schubert et al.*, 2004).

⁸²Diese Stressursachen gelten im weitesten Sinn auch für die terrestrischen Planeten.

CALLISTO: 20CSDRKFLO01+02 anaglyph image



Structural map

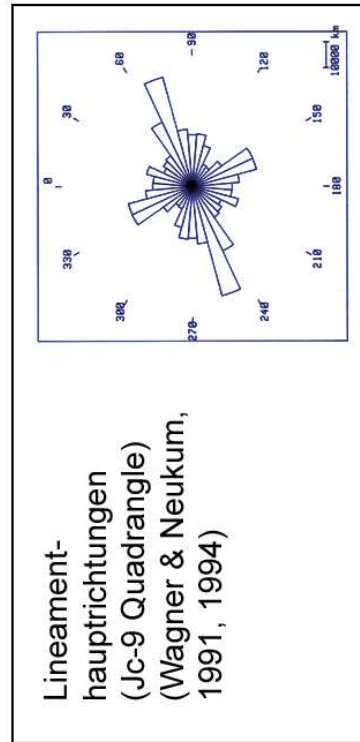
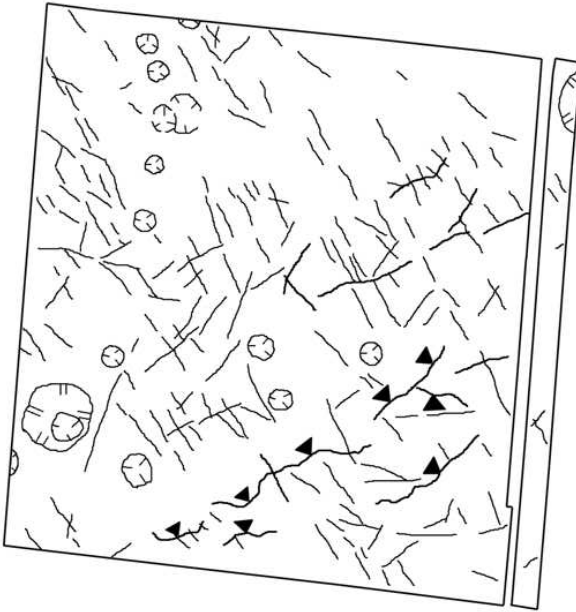


Abbildung 8.75.: Anaglyphendarstellung und Strukturkarte des Gebiets der *dark flows* (SSI-Zielgebiete 10CSDRKFLO01/02). Lineament-Richtungsrose (Gesamtlänge der Lineamente in Kilometer) nach *Wagner und Neukum* (1991, 1994b).

Volumenänderungen führen entweder zu einer globalen Expansion oder Kontraktion. In ersterem Fall kommt es zu Dehnungstektonik an der Oberfläche, es entstehen Grabenbrüche und Abschiebungen. Im anderem Fall führt eine globale Kontraktion zur Entstehung von Auf- oder Überschiebungen. Sowohl Expansion als auch Kontraktion verursachen willkürlich orientierte Richtungen der zugehörigen Strukturen über die gesamte Oberfläche (*Solomon, 1987*). Das auf Callisto festgestellte Lineamentsystem ist aber zu regelmäßig. Somit gibt es keinen schlüssigen Hinweis auf globale Expansion oder auch Kontraktion.

Auch für die zweite Gruppe der Stressursachen, Konvektionsbewegungen im festen Zustand (*solid state convection*), die bei großen Eissatelliten zu erwarten wären (vergl. *Squyres und Croft, 1986*, und Zitate darin) fehlen an der Callisto-Oberfläche jegliche tektonische Anzeichen. Störungen müssten das pilzförmig aufsteigende Material (*plume*) nachzeichnen, da sie sich bevorzugt parallel zur Richtung des aufsteigenden Materials bilden (ebd.).

Die dritte Gruppe (*shell deformation*) umfasst ausschließlich Stressursachen durch Gezeitenwirkungen. Zu unterscheiden sind hier (a) Gezeitenabbremmung (*tidal despinning*), (b) Gezeitendeformation (*tidal deformation*), und (c) ein Zurückweichen der Umlaufbahn um den Zentralplaneten (*orbital recession*).

Rezent rotieren die Galileischen Satelliten synchron um Jupiter. Nach ihrer Entstehung bestand dieser Zustand sicher noch nicht. Die starke Gravitationskraft des Jupiter ruft in den Satelliten einen in Richtung auf den Zentralplaneten gerichteten Gezeitenwulst hervor. Im idealen Fall elastischen Materials wäre dieser Wulst exakt auf den Zentralplaneten ausgerichtet. Im Inneren des Satelliten sorgt die Massenträgheit dafür, dass der Wulst der aktuellen Bahnbewegung des Satelliten hinterherwandert. Dadurch entsteht eine Drehkraft, die versucht, den Wulst exakt auf den Zentralplaneten auszurichten. Dies bremst aber schließlich im Lauf der Zeit die Eigenrotation des Satelliten solange ab, bis der synchrone Rotationszustand erreicht ist.

Die Einstellung der synchronen Rotation aus einem ursprünglich nicht-synchronen Zustand erfolgt in relativ kurzer Zeit und sehr früh in der Entwicklung eines Satelliten. Bereits nach nur 10^5 bis 10^7 Jahren müssten die Galileischen Satelliten bereits synchron rotiert haben (*Horedt und Neukum, 1984b*).

Die Hauptstressrichtungen durch die Abbremsung eines planetaren Körpers im Gezeitenpotential wurde für den Fall des innersten Planeten Merkur detailliert untersucht (*Pechmann und Melosh, 1979*, und Zitate darin). Die beiden Autoren modellierten den Aufbau von Merkur mit einer festen äußeren Schale und einem flüssigen Inneren, Callisto im Fall des Vorhandenseins eines Ozeans also durchaus vergleichbar. Die Gezeitenabbremmung ruft in diesem Modell ein Stressfeld hervor, das in den äquatorialen und mittleren Breiten (bis etwa $\pm 60^\circ$ Breite) orthogonal aufeinander stehende, NE-SW- und NW-SE-orientierte Scherbrüche (*strike-slip faults*) erzeugt. Zusätzlich sollten sich in den äquatorialen Breiten Nord-Süd-orientierte Kompressionsstrukturen (*thrust faults*) und in den Polregionen Ost-West-orientierte Abschiebungen entwickeln⁸³.

⁸³Merkur weist zudem noch tektonische Strukturen auf, die auf einer Kompression des Planeten beruhen (*Pechmann und Melosh, 1979*).

Ein Lineamentsystem mit annähernd den Hauptrichtungen NE-SW und NW-SE wurde in der Valhalla-Region von *Thomas und Masson* (1985) nachgewiesen, allerdings auf nicht kartenprojizierten Bilddaten, möglicherweise mit Ungenauigkeiten in der genauen Richtungsbestimmung (vergl. weiter oben). Die Autoren interpretierten diese beiden Richtungen als Teil eines globalen Netzes. Da zum Zeitpunkt der Entstehung von Valhalla der synchrone Rotationszustand wahrscheinlich bereits erreicht war und die Gezeitenabbremmung geologisch nicht mehr überliefert sein würde, diskutierten die Autoren die Möglichkeit, dass dieses alte Lineamentmuster durch den Valhalla-Impakt reaktiviert worden sein könnte.

Die von *Wagner und Neukum* (1991, 1994b) nachgewiesenen beiden Hauptrichtungen stehen zwar ebenso orthogonal aufeinander, sind aber um etwa 10 bis 15° im Uhrzeigersinn gedreht. Dieses Muster erscheint regelmäßig in beiden von den Autoren untersuchten Gebieten. Allerdings können beide Richtungen nicht ohne Weiteres auf Gezeitenabbremmung bzw. eine Reaktivierung dieser Schwächezonen zurückgeführt werden, da sie nicht exakt mit den theoretischen Richtungen von *Pechmann und Melosh* (1979) übereinstimmen.

Murchie und Head (1986) modellierten für Ganymed eine mögliche Reorientierung des Satelliten durch den geologisch jüngsten Großeinschlag, der das Gilgamesh-Becken bildete. Das durch einen derartigen Einschlag verursachte Massendefizit könnte ein Wandern des Beckens, d. h. eine Verstellung der ursprünglichen Ganymed-Rotationsachse um etwa 15° Richtung Pol bewirkt haben. Die prä-existierenden Richtungen von Strukturelementen wie Rillen oder Lineamente wurden dabei mitgeschleppt. Die Autoren fanden, dass die von *Bianchi et al.* (1985) statistisch nachgewiesenen Richtungen der Rillen auf den Paläopol vor der Reorientierung durch Gilgamesh zentriert sind.

Nimmt man ein ähnliches Szenario für Callisto an, könnten die von *Wagner und Neukum* (1991) nachgewiesenen und in den SSI-Daten bestätigten Lineamenthauptrichtungen den ehemals NE-SW- und NW-SE-orientierten Richtungen der (später immer wieder reaktivierten) Gezeitenabbremmung entsprechen, die bei der Verstellung der Rotationsachse durch einen großen Einschlag mitgeschleppt wurden. Möglicher Kandidat für ein derartiges Becken ist Valhalla, da es, abgesehen von den beiden wesentlich kleineren Becken Heimdall oder Lofn, (1) der letzte sehr große Einschlag war, der in der Callisto-Geschichte stattfand, und (2) im Bereich des Valhalla-Beckens noch die unverstellten NE-SW- und NW-SE-Richtungen nachgewiesen wurden (*Thomas und Masson*, 1985). Eine weitere Untersuchung, wie sich die Lineamentrichtungen ändern, ist auf dem vorliegenden Voyager- und Galileo-Bilddatenmaterial schwierig, da die gesamte Callisto-Oberfläche nicht mit einheitlicher Beleuchtungsgeometrie abgedeckt wurde. Wie weiter oben bereits erwähnt, sind in manchen Gebieten Lineamente nur schwer oder gar nicht erkennbar.

Ebenso ist nicht nachweisbar, ob es sich bei den Lineamenten um Scherbrüche handelt, wie vom Modell vorhergesagt (*Pechmann und Melosh*, 1979). Laterale Versätze an Geländeformen sind nicht festzustellen. Im Gebiet der *smooth plains* (vergl. Abb. 8.72 und 8.73) könnte es lokal zu Abschiebungen gekommen sein. Ausgeprägte Nord-Süd-Kompressionsstrukturen in den äquatorialen Gebieten fehlen ebenso wie Ost-West orientierte Abschiebungen in den Polgebieten. In den nördlichen Breiten sind sie wegen der schlechten Qualität der Voyager-Daten nicht nachweisbar, in den südlichen Breiten sind in den SSI-Daten (z. B. Zielgebiet G8CSSPOLAR01) keine Lineamente erkennbar.

Gezeitendeformation eines bereits synchron rotierenden Satelliten führt zu einem komplexeren System tektonischer Strukturen (*Squyres und Croft*, 1986). *Melosh* (1980) modellierte die Stressverteilung in einem Satelliten mit gebundener Rotation und fand in einem Bereich von etwa 30° um den dem Zentralplaneten genau gegenüberliegenden Punkt (hier den sub-Jovianischen Punkt bei einer Breite/Länge von 0°) ausgeprägt Nord-Süd ausgerichtete Kompressionsstrukturen. Außerhalb dieses Bereichs bilden sich in den äquatorialen und mittleren Breiten ähnlich wie bei der Gezeitenabbremmung NE-SW- und NW-SE-Scherbrüche. Für den Fall des Erdmonds bestätigten *Chabot et al.* (2000) in einer statistischen Richtungsanalyse auf der Basis neuerer Bilddaten (Clementine-Mission) im Großen und Ganzen die bereits bekannten Trends, konnten aber keine Kompressionsstrukturen in der Umgebung des Sub-Erdpunktes feststellen. Zumindest stimmen die von unterschiedlichen Beobachtern in unterschiedlichen Bilddatensätzen kartierten Lineamente weitgehend überein und bestätigen, dass es sich um reale Phänomene auf der Oberfläche handelt. Für Europa schlossen *Helfenstein und Parmentier* (1983) aus der Richtungsverteilung struktureller Phänomene auf Stressursachen, die auf einer derartigen Gezeitendeformation beruhen. Für Callisto kann diese Ursache aber weitgehend ausgeschlossen werden, da der Satellit bereits zu weit von Jupiter entfernt ist.

Vollkommen auszuschließen ist die dritte Stressursache der Gezeitenwechselwirkungen, die durch wachsende Entfernung eines Satelliten vom Zentralplaneten durch Drehimpulsaustausch verursacht wird. *Helfenstein und Parmentier* (1983) verwarfen diese Möglichkeit aufgrund ihrer Untersuchungen bereits für den relativ nah an Jupiter befindlichen Europa. Callisto in noch größerer Entfernung ist von einer solchen Wechselwirkung noch viel weniger betroffen.

Die vierte Gruppe der Stressursachen umfasst Einschlagsereignisse, vor allem die Entstehung von Becken. Tektonische Formen in Zusammenhang mit Multiringbecken wurden an anderer Stelle weiter oben bereits genannt (z. B. Abschnitte 8.4.2, 8.4.9, 8.5.2 und 8.5.7). Vereinzelt treten radiale Lineamente oder Rillen auf, die *Schenk* (1995) auf Impakte zurückführt, oder alternativ, aber weit weniger wahrscheinlich, auf endogene Ursachen.

8.6.11.3. Erosion entlang tektonischer Schwächezonen

Dass Erosion und Abtragung auf planetaren Oberflächen bevorzugt an tektonischen Schwächezonen mit Kluft- und Bruchsystemen angreifen, ist Bestandteil geowissenschaftlichen Allgemeinwissens. Die Callisto-Oberfläche verdeutlicht diesen Zusammenhang für eine nicht-terrestrische Oberfläche. Die beiden Anaglyphendarstellungen in Abb. 8.73 und 8.75 zeigen den Zerfall des hellen, topographisch hochstehenden Materials an der Oberfläche entlang von Klüften oder Brüchen (*Wagner et al.*, 2001). Details beider Gebiete sind in Abbildung 8.76 dargestellt.

Die beiden oberen Detailansichten in Bild 8.76 entstammen dem Zielgebiet 10CSSMTHPL01. Die Oberfläche der so genannten "*smooth plains*" besteht in der hoch aufgelösten Aufnahme aus nur wenige Kilometern langen, schmalen Kuppen oder Graten, deren Längsrichtung etwa mit der 150°-Richtung der Lineamentrose in Bild 8.73 zusammenfällt. Die Zerlegung in die einzelnen Massive erfolgte entlang ENE-WSW orientierter Klüfte oder Brüche. Erosion und Abtragung sind unterschiedlich weit fortgeschritten. An einigen Stellen sind die Massive und Kuppen bereits fast völlig eingeebnet, das dunkle Material bedeckt einige Reste dieser ehemals

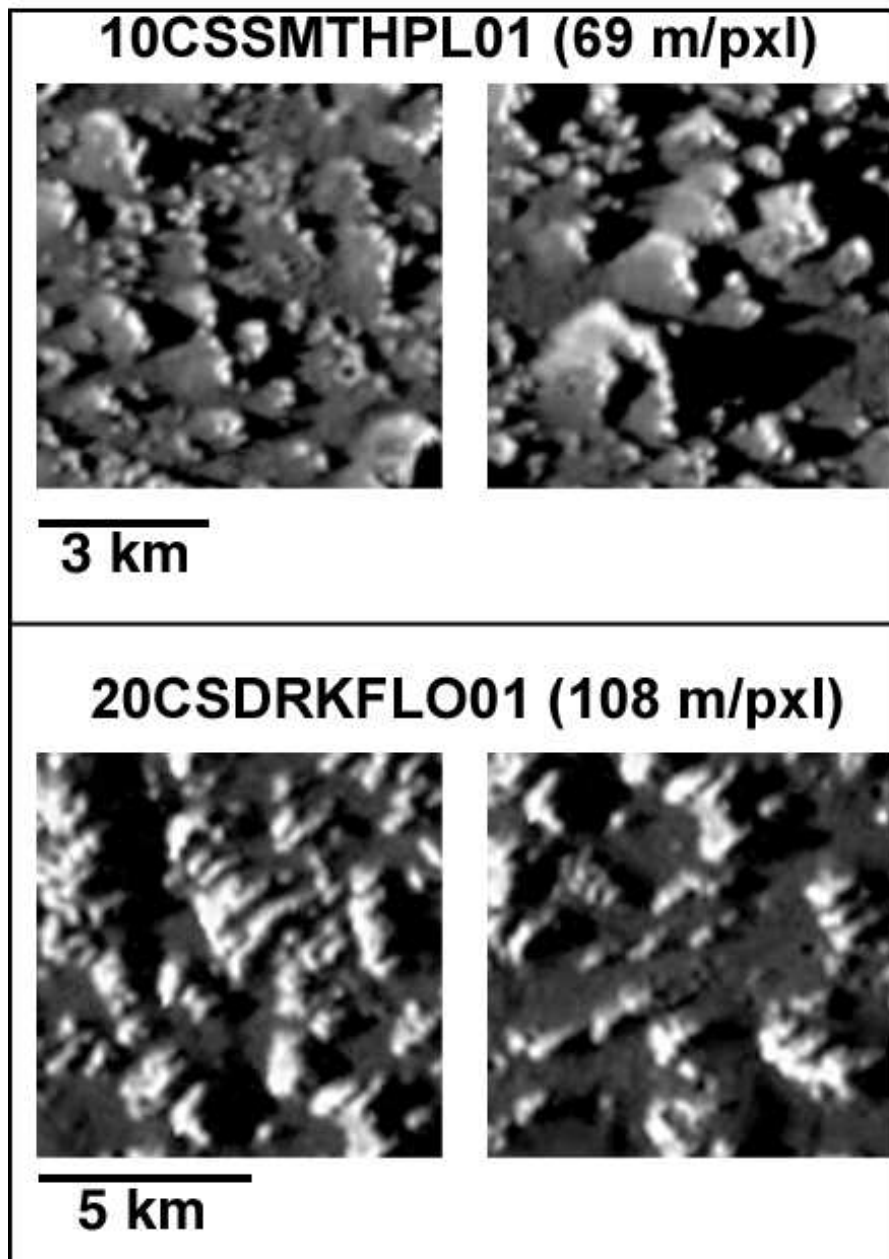


Abbildung 8.76.: Detailansichten der Massive aus den Zielgebieten 10CSSMTHPL01 und 20CSDRK-FLO01.

hoch stehenden Gebiete. An anderen Stellen sind die Kuppen noch relativ hoch und mehrere Kilometer lang. Gründe dafür sind (1) ursprünglich unterschiedliche topographische Position des Ausgangsmaterials ("bed ice") oder (2) regionale Unterschiede in der Verwitterungsbeständigkeit des Materials, bzw. Materialunterschiede. Hauptverwitterungsprozess ist die von *Moore et al.* (1999) beschriebene Sublimationsverwitterung.

Die beiden unteren Detailansichten in Bild 8.76 zeigen die Oberfläche des stark abgetragenen Palimpsests im Zielgebiet 20CSDRKFL01. Anders als im Zielgebiet 10CSSMTHPL01 sind die Massive hier mit ihren längeren Seiten entlang der Richtung NE-SW bis ENE-WSW orientiert. Die Massive und Kuppen erscheinen weicher als im C10-Zielgebiet. Dies ist sicher ein Effekt der Beleuchtungsgeometrie. Bei ähnlich niedrigem Sonnenstand wie in C10 würden die Kuppen vermutlich den Gratens des C10-Gebiets ähneln.

In beiden Zielgebieten wirken Erosion und Abtragung auf dem Asgardischen System angehörende geologische Einheiten, in beiden Fällen ein bereits stark abgetragenes Palimpsest, das bei geringerer Auflösung (Voyager) kaum als Impaktstruktur erkennbar war. Sollte das Kluft- und Bruchmuster wirklich durch Gezeitenabbremmung entstanden sein, müsste es in nachfolgender Zeit immer wieder reaktiviert worden sein, da aus der Frühzeit asynchroner Rotation vermutlich keine geologische Überlieferung mehr vorhanden ist. Die zahlreichen Impakte könnten hier entsprechend gewirkt haben.

Bemerkenswert ist, dass das gleiche Lineamentmuster auch noch in relativ jungen Einheiten wie den Ejekta von Tindr nachzuweisen ist (vergl. Abb. 8.74). Möglicherweise paust sich in dem bei niedrigem Sonnenstand aufgenommenen SSI-Bild der Untergrund durch, der ähnlich beschaffen sein könnte wie im C10-Zielgebiet, und dessen Kuppen, Massive und Vertiefungen durch die Tindr-Ejekta überdeckt werden.

8.6.12. Geologische Prozesse der Prä-Asgardischen Periode

Die Prä-Asgardische Periode umfasst den Zeitraum seit der (nicht überlieferten) Bildung der ersten Kruste bis zur Entstehung des Asgard-Beckens. Der Einschlag des Asgard-Projektils fand in *Model I* vor 4.19 Ga, in den beiden Varianten von *Model II* vor 4.3 Ga statt.

Die Prä-Asgardische Periode ist wie die nachfolgende Asgardische Periode geprägt durch (1) intensives Meteoritenbombardement, (2) Erosions- und Abtragungsprozesse, (3) Tektonik, (4) und möglicherweise durch heute nicht mehr nachweisbare kryovulkanische Aktivität.

Durch das intensive Meteoritenbombardement entstanden neben regulären Kratern Palimpseste, Penepalimpseste, Dom-Krater und Multiringbecken. Das Substrat, dem die meisten Krater aufsitzen, ist nicht aufgeschlossen. Daher ist nicht bekannt, welcher Natur das Basismaterial der Kraterebenen ist. Es könnte sich (a) um ein den Mond-Terraeinheiten ähnliches Material handeln, das bereits aus zahlreichen Einschlägen hervorgegangen ist, also um Impaktbrekzien und eventuell um Impaktschmelzen, (b) wegen des geringen Differenzierungsgrades von Callisto auch möglicherweise um Material aus der frühesten, noch die Akkretion begleitenden Impaktgeschichte ("Early Heavy Bombardment"; *Wetherill, 1975*), oder (c) auch teilweise um Einheiten,

die durch Kryovulkanismus entstanden sind, ähnlich den Mondmaria.

Eine erhöhte Rate der Sublimationsverwitterung ging vermutlich mit einer sehr hohen, exponentiell abfallenden Impaktrate ähnlich wie im inneren Sonnensystem einher. Eine exponentiell abfallende Impaktrate für die Frühzeit wird auch in den beiden Varianten des Kometenmodells nicht ausgeschlossen (*Zahnle et al.*, 1998, 2003). Damit war auch die Erosionsrate in dieser frühesten Periode höher als in der Zeit nach dem intensiven Bombardement. Kleinere Krater wurden dadurch stärker abgetragen. Erosionsprozesse äußern sich in einer flacheren Kraterhäufigkeitsverteilung unterhalb eines gegebenen Durchmessers. Der jeweilige Grenzdurchmesser ist altersabhängig: In den ältesten Einheiten wird die Verteilung bereits unterhalb von 2 - 3 km flacher. In jüngeren (z. B. Asgardischen) Einheiten sind Krater bis herab zu Durchmessern von 1 - 1.5 km oder sogar bis < 1 km noch weitgehend erhalten, erst darunter wird die Verteilung flacher.

Die weitere Erosionsgeschichte lässt sich aus den am höchsten aufgelösten SSI-Bilddaten (C21, C30) gut ablesen (vergl. z. B. Abbildung 8.67, Abschnitt 8.6.9.1). Krater im Kilometerbereich bis herab zu etwa 150 - 200 sind meist erodiert, in diesem Bereich ist die Verteilung flach. Unterhalb eines Kraterdurchmessers von ca. 100 bis 150 m sind die Verteilungen wieder steil, ähnlich den kleinen Kratern auf dem Erdmond. Ob dies letztendlich für alle weiteren Gebiete auf Callisto ebenfalls gilt, lässt sich nur mit umfangreicheren Bildmaterial klären.

Lediglich einige der jungen Krater (z. B. Doh) weisen auch in diesem Durchmesserbereich eine steile Verteilung auf. Ob die Erosionswirkung hier erst bei kleineren Durchmessern einsetzt, ist nicht festzustellen, da die Auflösung nicht ausreicht. Weiterhin ist eine steile Verteilung teilweise in einigen Daten der C3-Zielgebiete im Bereich zwischen 200 m und 1 km zu sehen (vergl. beispielsweise Abb. 8.25, Abschnitt 8.4.6). Episoden höherer und niedrigerer Erosionsraten könnten hier stattgefunden haben, falls Schichten unterschiedlich erosionsresistenten Materials an der Oberfläche aufgeschlossen waren.

Messungen der Kraterhäufigkeiten auf dem dunklen Verwitterungsrückstand in sehr hoher Auflösung (< 20 m/pxl) ergaben an unterschiedlichen Stellen mehr oder weniger ähnliche Modellalter von 3.4 - 3.6 Ga (*Model I*). Es scheint daher plausibel, dass die Erosions- und Abtragungsprozesse nach einer bestimmten Zeit weitgehend zum Stillstand gekommen sind oder zumindest so langsam verliefen, dass sich wieder eine steile Verteilung kleiner Krater ungestört einstellen konnte. In dieser Zeit vollzog sich allmählich der Übergang von einer exponentiellen Impaktrate zu einer mehr oder weniger konstanten Impaktrate. Daher liegt die Vermutung nahe, es könnte ein Zusammenhang zwischen der Sublimationsverwitterung, Erosion von Kratern in einem bestimmten Durchmesserbereich und der hohen Impaktrate in dieser Periode bestanden haben.

Da das gleiche Phänomen bei Ganymed nicht auftritt, müssen zusätzlich Materialunterschiede für die unterschiedlichen Erosionseffekte durch Impact auf beiden Satelliten verantwortlich gewesen sein. *Moore et al.* (1999) schrieben dies dem höheren Anteil von CO₂ auf Callisto zu. Möglicherweise wurde Kohlendioxid in der Kruste durch die hohe Einschlagsrate mobilisiert und konnte zur verstärkten Abtragung auf Callisto, anders als auf Ganymed beitragen. Seit der Zeit des LHB bei konstanter Einschlagsrate laufen Erosionsprozesse dagegen deutlich langsamer ab. In den beiden Varianten des Kometenmodells dagegen wäre der dunkle Rückstand mit wenigen

100 Ma vergleichsweise jung, die Sublimations- und Erosionsraten würden bis in diese Zeit mehr oder weniger linear verlaufen.

In der Prä-Asgardischen Periode entstanden eine Reihe größerer Multiringstrukturen, die zum überwiegenden Teil bereits so weit erodiert wurden, dass keine Details mehr zu erkennen sind. An einer ganzen Reihe von Stellen sind konzentrische Furchensysteme erhalten. Wenig Information über die durchschnittliche Krustendicke ist daraus abzuleiten. Aus einer Breite von 5 bis 10 km bei einigen dieser Furchen folgt eine Krustendicke von etwa 10 km, etwa die Hälfte des Wertes in Asgard oder Valhalla. Für eine genauere Statistik des Zusammenhangs zwischen Breiten und Abstände dieser Furchen und ihrer Altersstellungen würden Bilddaten in hoher Auflösung benötigt, wenigstens im Maßstab von 200 m/pxl.

Für eine dünnere Kruste und demzufolge für einen deutlich höheren Wärmefluss spricht auch, dass sich in der Prä-Asgardischen und Asgardischen Periode zahlreiche Palimpseste wie auf Ganymed bildeten. Die Interpretation von *Schenk et al.* (2004), wonach die Zahl der Palimpseste auf Callisto verglichen mit Ganymed weitaus geringer sei, kann hier nicht bestätigt werden: Die Callisto-Palimpseste waren in vergleichbarer Zahl vorhanden, sind aber stark abgetragen und deshalb nur schwer zu erkennen. Die meisten der unregelmäßig geformten hellen Flecken auf Callisto repräsentieren solche alten Palimpseste. Lediglich eine kleine Zahl (< 10) ist noch so gut erhalten, dass sie eindeutig als Palimpseste einzuordnen sind.

Neben den durch Großeinschläge verursachten tektonischen Strukturen weist Callisto ein recht einheitliches System an Lineamentrichtungen auf. Vor allem zwei orthogonale Hauptrichtungen von ENE-WSW bis NE-SW und von NNW-SSE bis NW-SE haben sich herausgebildet. Der Theorie nach könnten Gezeitenabbremmung und Einstellung synchroner Rotation dieses Muster verursacht haben. Da diese Abbremsung sehr schnell und in der frühesten Zeit erfolgte, bliebe dieses Muster nur dann erhalten, wenn die Richtungen durch nachfolgende Ereignisse, etwa größere Impakte, reaktiviert worden wären - oder die Callisto-Oberfläche müsste älter als ca. 4.4 Ga sein. Die zu beobachtende Drehung der Richtungen um 15° gegenüber den theoretischen Werten von NE-SW und NW-SE zeigt, dass unter Umständen eine Verstellung der Rotationsachse stattgefunden hat. Um dies genau zu prüfen müsste eine globale Abdeckung mit Bilddaten gleicher Beleuchtungsgeometrie vorhanden sein - dies eine Aufgabe für eine zukünftige Jupiter-Mission.

Anzeichen kryovulkanischer Aktivität sind in den vorliegenden Bilddaten aus dieser frühesten Periode nicht nachzuweisen. Die Möglichkeit, dass Callisto in dieser Zeit episodisch und vielleicht nur kurz vulkanisch aktiv war, ist nicht auszuschließen und erscheint plausibel angesichts der Größe des Satelliten und der Tatsache, dass Callisto wenigstens teilweise differenziert ist.

