

Die Shoemaker und Strangways-Krater: Zwei Impaktstrukturen in Australien in der GIS-gestützten Analyse von Fernerkundungs- und Geländedaten

HEIKO ZUMSPREKEL¹ & TORSTEN PRINZ²

Zusammenfassung: Die Berücksichtigung von Fernerkundungsdaten in geologischen Informationssystemen (GIS) bietet für die Erkundung von terrestrischen Impaktstrukturen neuartige Möglichkeiten. Am Beispiel der komplexen proterozoischen Impaktkrater Shoemaker und Strangways wird gezeigt, dass die Einbindung multispektraler Landsat TM-Daten, Radardaten (ERS-2), geophysikalischer Daten (Aeromagnetik, Aeroradiometrie), Geländebefunden und bereits vorhandener geologischer Karteninformation in ein GIS raumbezogene Abfragen gestattet und z.T. Wissenslücken schließen kann. So lassen sich ursprüngliche Kraterdurchmesser und Erosionsniveaus für beide Strukturen besser abschätzen.

Einleitung

Kosmische Projektile, die mit Geschwindigkeiten von mehr als 11 km/sec auf die Erdoberfläche treffen, erzeugen bei ihrem Einschlag charakteristische Kratermorphologien. Die Durchmesser solcher Impaktkrater können wenige Hundert Meter bis Hunderte von Kilometern betragen (s. z.B. GRIEVE et al., 1995). Größere Impaktstrukturen zeigen im Unterschied zu einfach gebauten, schüsselförmigen Kratern einen zunehmend komplexeren tektonischen Bau mit einer strukturellen Hebung (central uplift, Zentralberg) und morphologischen Gliederung des Kraterinneren (Abb.1).

Die bei Impaktereignissen auftretenden Druck- und Temperaturbedingungen führen in Abhängigkeit von der Entfernung zum Einschlagspunkt zur Verdampfung, Aufschmelzung, Brekziierung bzw. bruchhaften Verformung der vom Impakt betroffenen Gesteine (Targetgesteine). Impaktereignisse lassen sich somit anhand einer schockmetamorphen Überprägung der Targetgesteine eindeutig von endogen entstandenen geologischen Ringformen (z.B. Vulkanbauten, Salzdiapiren) unterscheiden.

Heute sind über 160 Impaktstrukturen auf der Erde bekannt, wobei in den letzten Jahren durchschnittlich fünf Strukturen neu entdeckt wurden (GRIEVE, 1998). Bei der Suche nach irdischen Impaktstrukturen kommt der Fernerkundung eine sehr wichtige Bedeutung zu, da ringförmige geologische Anomalien, die auf einen möglichen Meteoriteneinschlag hinweisen, durch optische Sensordaten oder mittels geophysikalischer Daten identifiziert werden können. Um Fernerkundungsdaten mit den für den eindeutigen Nachweis eines Impaktes unbedingt erforderlichen Geländebeobachtungen und petrografischen Untersuchungen sowie mit zusätzlicher Geoinformation verknüpfen und weitergehend analysieren zu können, bietet sich die Nutzung von Geoinformationssystemen (GIS) an, welche die Integration unterschiedlicher raumbezogener Datentypen erlauben.

¹ Dipl. Geol. Heiko Zumsprekel, Geologisch-Paläontologisches Institut, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Corrensstr. 24, 48149 Münster, Tel.: 0251/83-33908, Fax: 0251/83-33933, email: zumspre@uni-muenster.de, <http://www.uni-muenster.de/GeoPalaeontologie/Geologie/Ferngis/Gis.html>

² Dr. Torsten Prinz, IVV Geowissenschaften, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Robert-Koch-Str. 26-28, 48149 Münster, Tel.: 0251/83-30015, Fax: 0251/83-38352, email: prinz@uni-muenster.de, <http://ivvgeo.uni-muenster.de>

Auf dem australischen Kontinent sind aufgrund der geringen Deformation proterozoischer Gesteine und der hohen tektonischen Stabilität Australiens während des Phanerozoikums viele alte Impaktstrukturen erhalten (s. SHOEMAKER & SHOEMAKER, 1996), die aufgrund ihres hohen Erosionsgrades einen Einblick in tiefer gelegene tektonische Stockwerke unterhalb des ursprünglichen Kratergrundes ermöglichen. Die nur spärlich entwickelte oder naturbelassene Vegetation im australischen Inland begünstigt zudem das Erkennen von ringförmigen Strukturen in Luft- und Satellitenbildern. Mit der Shoemaker-Struktur in Westaustralien und der Strangways-Struktur in Nordaustralien wurde an zwei ausgewählten komplexen Impaktstrukturen, die in ihrer Größe und ihrem tektonischem Bau vergleichbar sind, eine GIS-gestützte Analyse von Fernerkundungs- und Geländedaten durchgeführt.

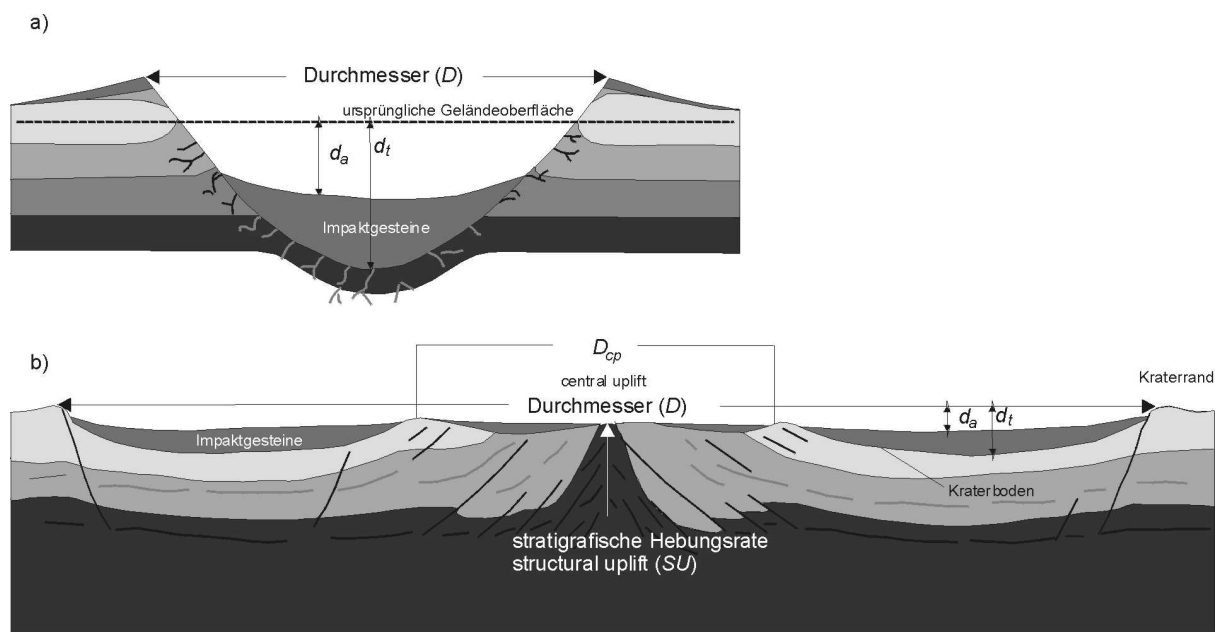


Abb. 1: Schematisches Profil durch eine einfache (a) und komplexe (b) Impaktstruktur mit morphometrischen Parametern (d_a = scheinbare Kratertiefe, d_t = wahre Kratertiefe, $d_t - d_a$ = Mächtigkeit der Impaktschmelzdecke, D_{cp} = Durchmesser des central uplift).

Impaktsignaturen im Gelände

Shoemaker-Struktur

Die von BUNTING et al. (1980) auf ein Alter von ca. 1630 Ma datierte Shoemaker-Struktur (früher Teague Ring oder Teague Dome; $25^{\circ}52' S$ $120^{\circ}53' E$) wurde zuerst von BUTLER (1974) als ein möglicher Impaktkrater beschrieben. Im Rahmen von flächendeckenden geologischen Kartierungen wurde die Struktur von BUNTING et al. (1982) und PIRAJNO (1999) im Maßstab 1 : 250 000 bzw. 1 : 100 000 geologisch aufgenommen. Im Zuge ihrer Studien über proterozoische Impaktstrukturen Australiens wurde der Krater auch von SHOEMAKER & SHOEMAKER (1996) mehrfach im Gelände untersucht.

Der Impakt erfolgte in siliziklastische Sedimentgesteine der paläoproterozoischen (1700 - 1800 Ma) Earahedy Group und betraf auch das unterlagernde granitoide, archaische Basement. Der heutige Rand der Struktur ist in Luftbildern deutlich anhand des Ausstreichens von dunklen, eisenreichen Gesteinen der Frere-Formation (BIFs) und

klastischen Gesteinen der Yelma-Formation zu erkennen, die in Form einer ringförmigen Synklinale das aufgerichtete archaische Basement im Kraterzentrum umschließen (Abb. 2). Höhere Einheiten der Earaheedy Group (Wandiwarra Group und Princess Range Quartzite) sind nur im NW erhalten. Das heutige Erosionsniveau liegt unterhalb des ursprünglichen Kraterbodens, so dass der äußere Kraterrand und sämtliche Impaktgesteine (Schmelzen und Brekzien) nicht mehr erhalten sind. Schockmetamorphe Indikatoren sowohl makroskopischer wie mikroskopischer Ausbildung beschränken sich auf vereinzelte Vorkommen von Strahlenkegeln (shatter cones) und planaren Deformationslamellen (PDFs) in Quarzkristallen des granitoiden Basement. Große Teile des Kraters werden heute von jungen Salzseeablagerungen, Dünenbildungen und z.T. lateritischen Hartkrustenbildungen bedeckt.



Abb. 2: Landsat-TM-Bild (321 [rgb]) der Shoemaker-Impaktstruktur in Westaustralien. Schematisch angedeutet ist der Verlauf der ringförmigen Synklinale um den granitoiden Kern der Struktur (gestrichelte Linie).

Strangways-Struktur

Die von SPRAY et al. (1999) auf 676 +/- 6 Ma datierte Strangways-Struktur im Northern Territory (15° 12' S 133° 35' E) wurde zuerst von GUPPY et al. (1971) als Impaktkrater identifiziert. Die detaillierteste geologische Aufnahme als Impaktstruktur stammt von SHOEMAKER & SHOEMAKER (1996), besitzt jedoch nur einen Übersichtscharakter (Abb. 3b). Das Targetmaterial besteht aus wenig deformierten Sedimentgesteinen der meso- bis neoproterozoischen Roper Group und dem unterlagernden granitischen Basement. Ähnlich wie bei dem Shoemaker-Krater werden die granitoiden Gesteine im Bereich der zentralen Aufwölbung kranzförmig von den klastischen Sedimentgesteinen der Roper Group umgeben, wobei mit zunehmender Entfernung vom Kraterzentrum stratigrafisch jüngere Einheiten austreichen. Das heutige Erosionsniveau liegt deutlich niedriger als bei der Shoemaker-Struktur, so dass N^o des Zentrums lokale Reste der ehemals zusammenhängenden Decke aus Impaktschmelzgesteinen und -brekzien erhalten sind. Makroskopisch im Gestein ausgebildet finden sich shatter cones in den granitoiden Gesteinen des Basement sowie in den ältesten Sedimentgesteinen der Roper Group. Als weiterer mikroskopischer Indikator der Schockbeanspruchung treten in den Graniten und Gneisen zahlreiche planare Deformationslamellen in Quarzen auf (PDFs).

Der SW^o Bereich der zentralen Erhebung wird von Kreidesandsteinen (Mullamen beds) diskordant überlagert, weite Bereiche des Kraterinneren und Kraterandes werden zudem von känozoischen Ablagerungen bedeckt. Im N wird die Strangways-Struktur von frühkambrischen Vulkaniten diskordant überlagert, die in weiten Teilen Nordaustraliens und in angrenzenden Bereichen Westaustraliens verbreitet sind (Antrim Plateau Volcanics).

Impaktsignaturen in Fernerkundungsdaten

Für die Analyse beider Impaktstrukturen auf der Basis von Fernerkundungsdaten standen Landsat TM-Daten, Luftbildaufnahmen, Radardaten vom Typ ERS-2, geophysikalische Daten (Aeroradiometrie, Aeromagnetik) und Laser-Altmetriedaten zur Verfügung. Da über die Strangways-Struktur keine geeigneten digitalen Höhendaten vorlagen, wurde auf der Basis topografischer Karten im Maßstab 1 : 100 000 ein digitales Höhenmodell (DEM) generiert.

Nach der statistischen Analyse der Landsat TM-Daten wurden insbesondere Originalkanäle, Ratios und Hauptkomponenten zur Erstellung von Falschfarbkompositen herangezogen, die einen möglichst unkorrelierten, maximalen spektralen Informationsgehalt hinsichtlich der an der Oberfläche austreichenden Gesteinseinheiten aufweisen (zur Methodik vgl. ZUMSPREKEL & PRINZ, 2000). Im Falle der Shoemaker-Struktur ließen sich insbesondere durch eine Kombination der TM-Ratios 5/7, 5/4, 4/2, welche bereits von DAUTH (1997) zur Kartierung vergleichbarer (semi)arider Gebiete Westaustraliens erfolgreich angewendet wurde, Rückschlüsse auf das Austreichen von Impaktlithologien wie auch auf Regolithbildungen ziehen. Farbkompositen aus Hauptkomponenten höherer Ordnung, in denen spektrale Variationen zwischen Kanälen des VIS und NIR wiedergegeben werden, erwiesen sich in beiden Untersuchungsgebieten als besonders geeignet, um den Streichverlauf einzelner Gesteinseinheiten innerhalb proterozoischer Sedimentgesteine differenzieren zu können.

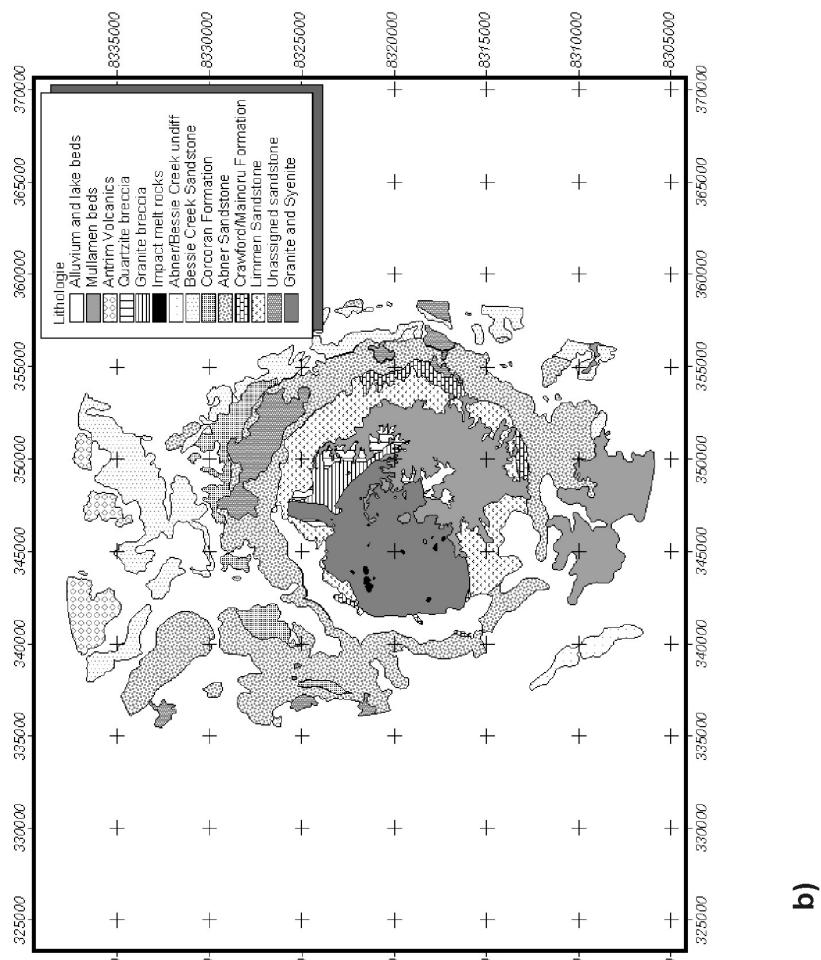
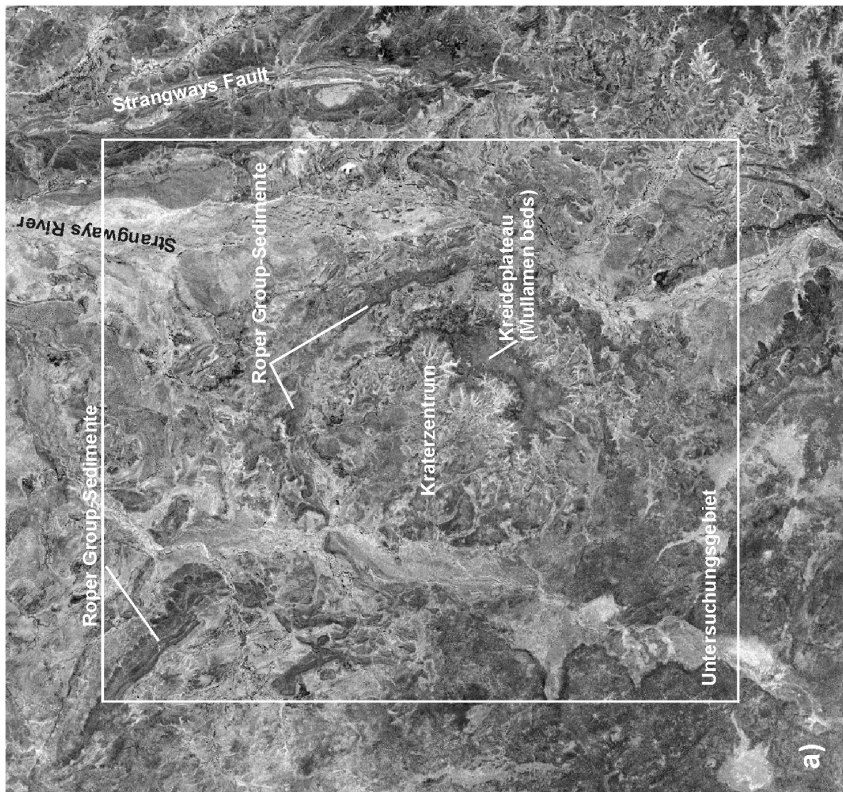


Abb. 3: (a) Landsat-TM-Bild (S/W-Bild der Hauptkomponenten 432 [rgb]) und (b) Geologische Übersichtskarte (modifiziert nach SHOEMAKER & SHOEMAKER, 1996) der Strangways-Impaktstruktur in Nordaustralien.

Im Falle der Strangways-Struktur ist aufgrund der höheren Vegetationsbedeckung eine Ableitung geologischer Information aus multispektralen Daten nur begrenzt möglich. Um die heutige morphotektonische Ausprägung der Kraterstruktur mittels Fernerkundungsdaten beurteilen zu können, wurden die zuvor aufbereiteten ERS-2-Radardaten in Kombination mit dem aus topografischen Karten abgeleiteten DEM in die Gesamtbetrachtung einbezogen (Abb.4). Die konzentrische Anordnung verwitterungsresistenter Sandsteineinheiten der Roper Group kann in 2,5-dimensionalen Betrachtung mit morphologischer Überhöhung deutlich visualisiert werden.

Informationen über die Beschaffenheit des tieferen Krateruntergrundes lassen sich aus den geophysikalischen Daten ableiten. Aeroradiometrische Daten, in denen gesteinspezifische K-, Th- und Uran-Konzentrationen aufgezeichnet sind, erlauben den direkten Rückschluss auf die Verteilung von kristallinem Basement im Bereich des central uplift anhand höherer Kalium-Gehalte. Zusätzlich dient die Betrachtung der aeromagnetischen Information einer Abschätzung kleinräumiger Variationen im Untergrund, wie z.B. basaltischer Gänge oder komplex verstellter Sandsteine im Kraterzentrum. Insgesamt zeichnet sich das Impaktzentrum durch ein ‚magnetisches Hoch‘ aus.

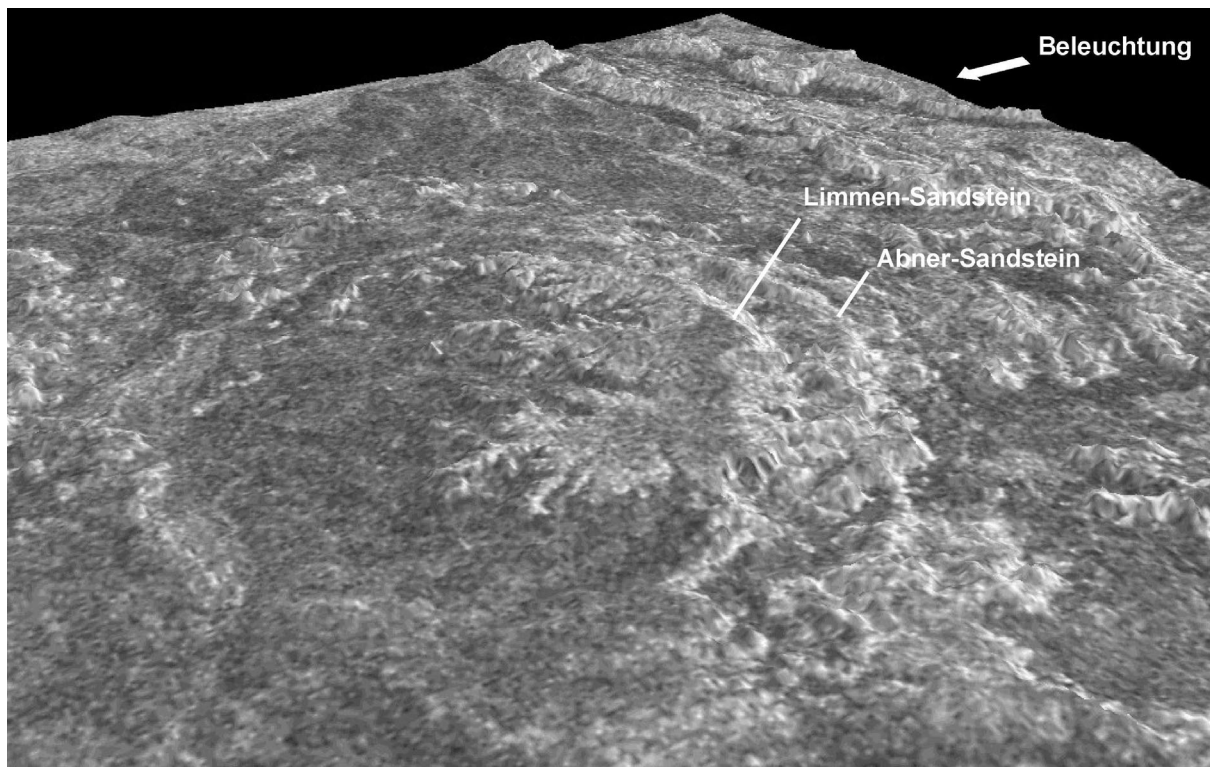


Abb. 4: Kombination aus DEM und ERS-2-Radardaten zur 2,5-D-Visualisierung der morphotektonischen Charakteristika des Strangways-Kraters. Die Beleuchtungsrichtung (Osten) beider Datensätze wurden aufeinander angepasst, wodurch z.B. die Lagerungsverhältnisse der verwitterungsresistenten Sandsteineinheiten im central uplift deutlich werden.

Analyse im GIS

Aufgrund der Vielzahl indikativer Parameter in dem nahezu geschlossenen geologischen System Impaktkrater liegt ihre Auswertung in einem *Geologischen Informationssystem* (GIS) nahe. Wesentliches Element der Strukturen ist die typische konzentrische Abfolge impaktspezifischer Gesteinsformationen bzw. die impakttektonisch bedingte Verstellung des

Target. Hinzu kommen mineralogische Veränderungen der Gesteine im makro- und mikrokristallinen Bereich, wie z.B. die bereits oben beschriebenen PDFs. Bedingt durch das unterschiedliche Erosionsniveau lassen sich nicht alle typischen Elemente bei der heutigen Betrachtung beider Strukturen in ihrer ursprünglichen Ausdehnung untersuchen. Das geologische Informationssystem bietet nun die Möglichkeit, auftretende Lücken in der regionalen Verteilung eines einzelnen Impaktindikators mit der Komplementärinformation einer anderen Indikativgruppe nach dem Schichtenmodell zu schließen (Abb. 5). Viele wichtige geometrische Kraterparameter, wie z.B. die ursprüngliche Kratergröße, der Durchmesser und die Tiefe der Exkavationshohlform lassen sich durch die Betrachtung der räumlichen Verteilung dieser unterschiedlichen, aber doch voneinander abhängigen Indikatoren berechnen. So entspricht z.B. die Verbreitung von shatter cones nach FRENCH (1998) annähernd der Ausdehnung der ursprünglichen Kraterhohlform. Genauso lässt sich eine derartige Abschätzung aber auch über die stratigrafische Hebungsrates im Zentrum des Kraters ermitteln. Betrachtet man die Strangways-Struktur, finden sich die einzigen aufgeschlossenen shatter cones ausschließlich im N und NW des Kraterzentrums. Im S und SE können diese nicht zur Abschätzung der Geometrie der zentralen Aufwölbung herangezogen werden – hier muss die auf der Basis von multispektralen Fernerkundungsdaten ermittelte Verbreitung des Limmen-Sandsteins die Komplementärinformation liefern. Die synoptische Betrachtung wichtiger Impaktindikatoren kann Theorien und Berechnungen bzgl. seiner ehemaligen Dimensionen und Exkavationstiefe, seines energetischen Haushalts etc. stärken. So werden Kausalabfragen durch die Funktionalität des GIS unterstützt. Hinzu kommen alle Geländeinformationen als Sachdatensätze; ihnen folgen die Spektralmessungen aller wichtigen Gesteinsgruppen. Gerade das Zusammenspiel von GPS-eingemessenen Sachinformationen der Feldkartierung in repräsentativen Testarealen erlaubt ihre Kausalverknüpfung im GIS (Abb.6).

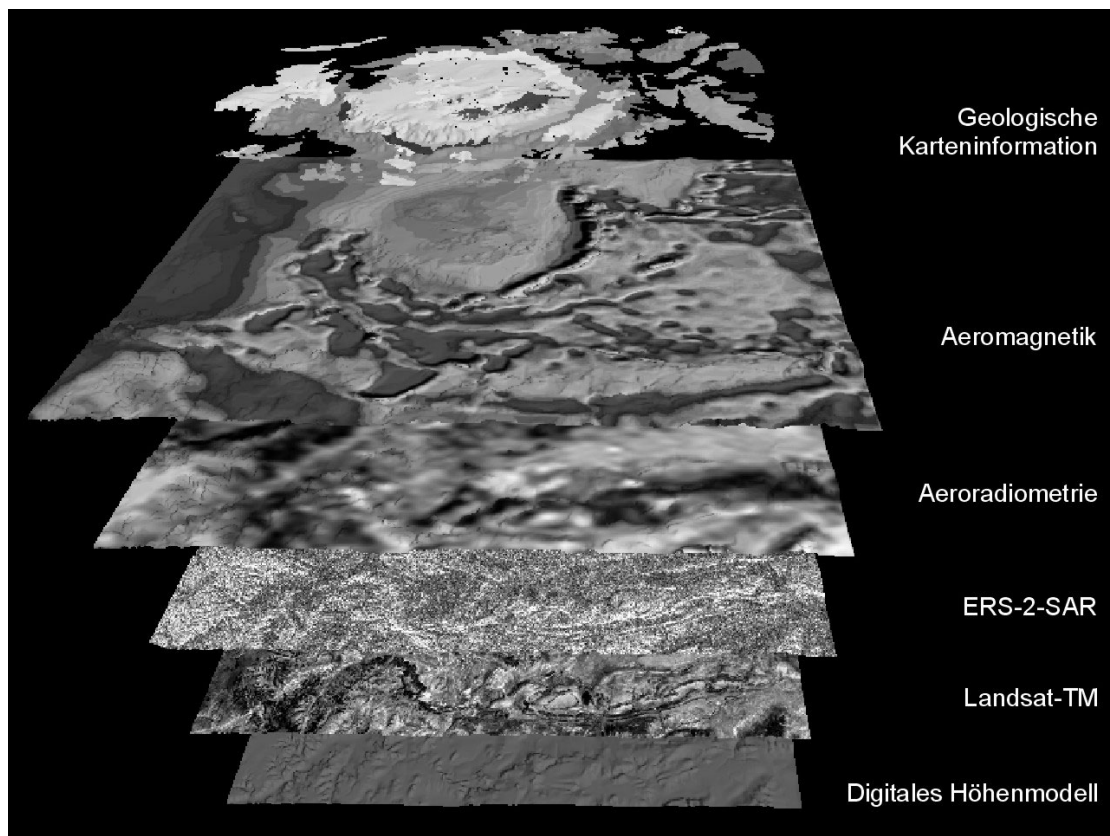


Abb. 5: Virtuelles Schichtenmodell im ‚Krater-GIS‘, basierend auf Fernerkundungsdaten und geophysikalischen Messungen am Beispiel der Strangways-Struktur.

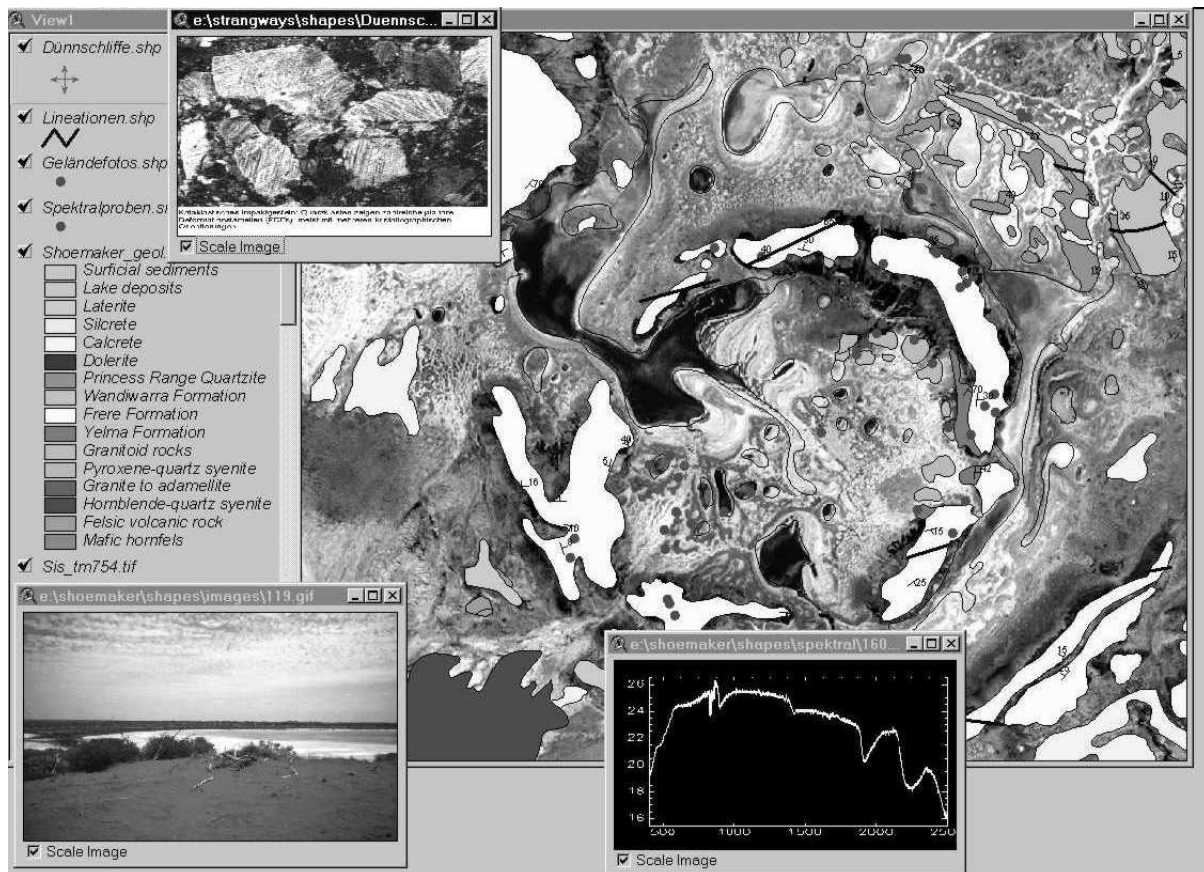


Abb. 6: Verknüpfung von geologischer Karteninformation, Fernerkundungsdaten, Geländebefunden und Labormessungen im ‚Krater-GIS‘ am Beispiel der Shoemaker-Struktur.

Kratermorphometrie, Schlussfolgerungen und Ausblick

Anhand von eindeutig im GIS definierbaren Größenparametern der heute noch sichtbaren Strukturen können für die Impaktkrater Strangways und Shoemaker Rückschlüsse auf ihre ursprünglichen Dimensionen gezogen werden. Dieser als Kratermorphometrie bezeichnete Prozess basiert auf der empirischen Analyse an lunaren Impaktstrukturen, deren Morphologie besser erhalten ist (z.B. PIKE, 1977). Eine kongruente Übertragung der Morphometrie von lunaren auf terrestrische Impaktstrukturen ist nicht ohne weiteres möglich. So zeichnen sich z.B. einfache Krater auf dem Mond durch eine größere Kratertiefe im Vergleich zum Durchmesser aus als auf der Erde, was nach MELOSH (1989) auf die unterschiedlichen Gravitationskräfte zurückzuführen ist.

Die Ableitung von Gesetzmäßigkeiten nach rein morphologischen Parametern ist bei terrestrischen Impaktstrukturen aufgrund der fortgeschrittenen Erosion oftmals schwierig. An detailliert untersuchten komplexen Strukturen ergibt sich die Möglichkeit, die stratigrafische Hebungsrates (stratigraphic uplift, SU) im central uplift als zusätzliche Größendimension zu erfassen und mit den morphologischen Parametern in Bezug zu setzen (vgl. Abb. 1). Auf diese Weise können auch im Falle von erodierten Strukturen Aussagen über ihre ursprünglichen Dimensionen getroffen werden. In Messungen an terrestrischen Kratern, die seit längerem kontinuierlich fortgeführt werden (z.B. GRIEVE et al. 1981, GRIEVE & PESONEN 1992, GRIEVE & PILKINGTON 1996, GRIEVE 1998), stützt man sich derzeit auf die

stratigrafische Hebungsrates von 24 Impaktstrukturen zur Bestimmung des ursprünglichen Kraterdurchmessers. Anhand der von GRIEVE & PILKINGTON (1996) gezeigten Beziehung $SU = 0,086 D_{final}^{1,03}$ lässt sich bei einer Mächtigkeit der Sedimentgesteine von 2500 m im Falle von Strangways ein ursprünglicher Mindestkraterdurchmesser von 26 km postulieren, was mit dem heute sichtbaren Kraterdurchmesser korreliert. Das heute angeschnittene Erosionsniveau des granitoiden Basement im Kern der Struktur ist jedoch unbekannt, deshalb kann der ursprüngliche Durchmesser u.U. deutlich größer sein. Eingeschränkt wird diese Aussage durch die regionalgeologische Strangways Fault im E der Struktur (Abb. 3a), die trotz ihres höheren Alters nicht durch das Impaktereignis beeinträchtigt worden ist und sich lediglich in 19 km vom Kraterzentrum befindet ($D_{final} = \text{max. } 38 \text{ km}$).

Für die Shoemaker-Struktur weisen analoge Betrachtungen auf eine stratigrafische Hebungsrates von ca. 3-4 km und einen Mindestdurchmesser von ca. 40 km, obwohl die Zugehörigkeit einiger Gesteinsfolgen zur Zentralerhebung selbst noch ungeklärt sind. Aufgrund der tiefgreifenden Erosion ist noch unklar, ob die gesamte Struktur lediglich den Bereich des central uplift repräsentiert.

In der Gesamtschau aller verfügbaren Daten, insbesondere der Fernerkundungsdaten, ist es außerordentlich bemerkenswert, dass weite Teile beider Impaktstrukturen trotz ihres hohen Alters noch heute erhalten sind. Dies legt unmittelbar die Schlussfolgerung nahe, dass die Krater über längere Zeiträume der Erdgeschichte von jüngerer Ablagerung bedeckt wurden und somit vor Erosion geschützt waren. Für die Strangways-Struktur lässt sich durch die Vorkommen unbeeinträchtigter kambrischer Vulkanite belegen, dass der Krater bereits zu Beginn des Kambriums sein heutiges Erosionsniveau erreicht hatte. Der Zeitraum zwischen Kambrium und Jura ist geologisch nicht überliefert, seit dem Tertiär wird der Krater von den Sedimenten der Kreide erosiv ausgeräumt. Vergleichbares muss auch für die Shoemaker-Struktur angenommen werden; diese Vermutung kann jedoch aufgrund fehlender geologischer Überlieferung in Form jüngerer Ablagerungen nicht belegt werden.

Die oben aufgezeigten verschiedenartigen Untersuchungen belegen klar den hohen Stellenwert eines geologischen Informationssystems für das in sich geschlossene geologische Phänomen eines Impaktereignisses. Aufgrund der starken Erosionsanfälligkeit von terrestrischen Impaktstrukturen ist eine Lückenhaftigkeit in ihrer geologischen Aufnahme mittels Geländebefunden zwangsläufig. Ein übergreifendes geologisches Informationssystem bietet den Wissenschaftlern jedoch die Möglichkeit, interaktiv einen methodischen Schlüssel zur Interpretation dieser bedeutenden geologischen Erscheinungsformen zu erarbeiten und weiterzuführen. Hier ist insbesondere die Berücksichtigung unterschiedlicher, synoptischer Fernerkundungsdatensätze erforderlich, da eines der markantesten Charakteristika jedes Impaktkraters die konzentrische Abfolge lithologischer Einheiten an der Erdoberfläche ist. In Zukunft wird die dreidimensionale Visualisierung von kraterrelevanten Informationen innerhalb eines solchen Informationssystems an Bedeutung gewinnen.

Dank

Die Autoren danken der Australian Geological Survey Organisation für die Bereitstellung der geophysikalischen Rohdaten und Laseraltimetrie-Daten. Den Besitzern der Eley Station (N.T.) und Cunyu Station (W.A.) sei für die Erlaubnis zur Durchführung der Geländearbeiten und für die logistische Unterstützung während dieser Zeit gedankt. Die Fernerkundungsabteilung der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe stellte für die spektralen Messungen dankenswerterweise ihr Laborspektrometer Lambda-9 zur Verfügung.

Literatur

- BUNTING, J.A., BRAKEL, A.T. & COMMANDER, D.P., 1982: Nabberu, Western Australia. - 1:250 000 Geological Series map and explanatory note, Geological Survey of Western Australia, Perth.
- BUNTING, J.A., DE LAETER, J.R., & LIBBY, W.G., 1980: Evidence for the age and cryptoexplosive origin of the Teague Ring structure, Western Australia. - Geological Survey of Western Australia, Annual Report for 1980: 125-129.
- BUTLER, H., 1974: The Lake Teague ring structure, Western Australia: an astrobleme?. - *Search* **5**: 534-536.
- DAUTH, C., 1997: Airborne Magnetic, Radiometric and Satellite Imagery for Regolith Mapping in the Yilgarn Craton of Western Australia. - *Exploration Geophysics*, **28** : 199-203.
- FRENCH, B.M., 1998: Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures. - 120 S., LPI Contribution. **954**, Lunar and Planetary Institute, Houston.
- GRIEVE, R.A.F., 1981: Constraints on the formation of ring impact structures, based on terrestrial data. - In: SCHULTZ, P.H.; MERRIL, R.B. (Hrsg.): Multi-Ring Basins: Formation and Evolution. - Proc. Lunar Sci. Conf. **12A**: 37-57, Pergamon Press, Houston.
- GRIEVE, R.A.F., 1998: Extraterrestrial impacts on earth: the evidence and the consequences. - in: GRADY, M.M., HUTCHISON, R., MCCALL, G.J.H., ROTHERY, D.A. (Hrsg.): Meteorites: Flux with Time and Impact Effects, Geological Society Special Publications **140**: 105-131, Cambridge University Press, London.
- GRIEVE, R.A.F.; PESONEN, L.J., 1992: The terrestrial impact cratering record. - *Tectonophysics* **216**: 1-30.
- GRIEVE, R.A.F.; PILKINGTON, M., 1996: The signature of terrestrial impacts. - in: A.Y. GLIKSON (Hrsg.): Australian Impact structures. - *AGSO Journal* **16** (4): 399-420, Australian Geological Survey Organisation, Canberra.
- GRIEVE, R.A.F., RUPERT, J., SMITH, J., THERRIAULT, A., 1995: The record of terrestrial impact cratering. - *GSA Today*, **189** (5): 194-196.
- GUPPY, D.J., BRETT, R., MILTON, D.J., 1971: Liverpool and Strangways Craters, Northern Territory: Two Structures of Probable Impact Origin. - *Journal of Geophysical Research* **76** (26): 5387-5393.
- MELOSH, H. J., 1989: Impact Cratering: A Geologic Process. - 245 S., Oxford Monographs on Geology and Geophysics. **11**, Oxford University Press, New York, Oxford.
- PIKE, R.J., 1977: Size dependence in the shape of fresh impact craters on the Moon. - In: RODDY, D.J., PEPIN, R.O. & MERRIL, R.B. (Hrsg.): Impact and Explosion Cratering: 489-509, Pergamon Press, New York.
- SHOEMAKER, E.M. & SHOEMAKER, C.S., 1996: The Proterozoic impact record of Australia. - in: A.Y. GLIKSON (Hrsg.): Australian Impact structures. - *AGSO Journal* **16** (4): 379-398, Australian Geological Survey Organisation, Canberra.

PIRAJNO, F., 1999: Nabberu, W.A. Sheet 3046. - Western Australia Geological Survey, 1: 100 000 Geological Series, Perth.

SPRAY, J.G., KELLEY, S.P., DENCE, M.R., 1999: The Strangways Impact Structure, Northern Territory, Australia: geological setting and laser probe $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology. - Earth and Planetary Science Letters **172**: 199-211.

ZUMSPREKEL, H. & PRINZ, T., 2000: Computer enhanced multispectral remote sensing data: a necessary tool for the geological mapping of Archean terrains in (semi)arid environments. - Computer and Geosciences **26**: 87-100.