

Vermessung von Dinosaurierskeletten mit Stereophotogrammetrie und Laserscanner

ALBERT WIEDEMANN¹ & ALOYS WEHR²

Abstract: To derive physiological data of Dinosaurs, it is necessary to determine the volume and the surface area of this animals. For this purpose, a detailed survey of the reconstructed skeletons is required. The skeletons of three Dinosaurs in the Museum for Natural Science in Berlin have been surveyed using stereophotogrammetry and close range laser scanners. Some results are presented in this paper.

1. Zielsetzung und Aufgabenstellung




Um Daten über das Leben und Sterben der Dinosaurier zu sammeln, sind die Skelette detailliert zu untersuchen. Eine Vielzahl an physiologischen Daten lassen sich ableiten, wenn man die Eigenschaften noch existierender Tiere mit Methoden der Vergleichenden Physiologie anhand des Körpervolumens und der Körperoberfläche hochrechnet. Diese Größen wiederum lassen sich mit Hilfe einiger Modellannahmen bestimmen, wenn präzise Daten über die aufgebauten Skelette vorliegen.

Das Institut für Physiologie der Freien Universität Berlin trat an das Fachgebiet Photogrammetrie und Kartographie der Technischen Universität Berlin mit der Bitte heran, eine Vermessung des Skeletts des *Brachiosaurus brancai* im Naturkundemuseum der Humboldt-Universität Berlin durchzuführen. Dabei handelt es sich um das größte in einem Museum aufgebaute Saurierskelett der Welt. Es wurde 1907 bis 1912 in Tendaguru, damals Deutsch-Ostafrika, heute Tansania, geborgen und anschließend in Berlin aufgebaut [NORMAN 1991]. Lediglich Teile des Schwanzes fehlten, die durch Teile eines vergleichbaren Saurierfundes ergänzt werden. Aus Gründen der Stabilität mußte der Schädel durch eine leichtere Gipskopie ersetzt werden, der Originalschädel liegt in einer Vitrine vor dem Skelett. Die Vermessung wurde 1993/94 mit konventionellen photogrammetrischen Methoden durchgeführt.

Nach den Erfahrungen am *Brachiosaurus* wurde 1997 die Vermessung der Skelette von zwei weiteren Sauropoden im Berliner Naturkundemuseum, *Diplodocus carnegii* und des *Dicraeosaurus hansemanni*, in Angriff genommen. Auch *Dicraeosaurus* stammt aus Tendaguru, lediglich der Kopf wurde ebenfalls aus Gips nachgebildet. *Diplodocus* ist eine komplette Gipskopie eines Skeletts aus den USA. Da das Original aus einer Lagerstätte dunklen Gesteins stammt, wurde auch die Kopie entsprechend eingefärbt, während die beiden anderen Saurierskelette deutlich heller sind. Bei diesen beiden Sauriern wurde neben der stereophotogrammetrischen Aufnahme auch die beiden Laserscanner des Instituts für Navigation der Universität Stuttgart zum Einsatz gebracht. In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten der Saurierskelette, der Aufnahmen und der Ergebnisse zusammengefaßt:

¹ Dipl.-Ing. ALBERT WIEDEMANN, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Photogrammetrie und Kartographie, Sekr. EB9, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin, e-mail: albert@fpk.tu-berlin.de

² Dr.-Ing. ALOYS WEHR, Universität Stuttgart, Institut für Navigation, Geschwister-Scholl-Str. 24D, 70174 Stuttgart, e-mail: wehr@nav.uni-stuttgart.de

	<i>Brachiosaurus brancai</i>	<i>Diplodocus carnegii</i>	<i>Dicraeosaurus hansemanni</i>
			
Länge im Grundriß	18 m	23 m	13 m
Höhe	12 m	5 m	4 m
Paßpunkte	20	29	17
Stereophotogrammetrie			
aufgen. Seiten	2	1	1
Bildmaßstab	ca. 1 : 200	ca. 1 : 100	Ca. 1 : 100
Basen	2	3	1
Polygone	572	993	322
Objektpunkte	6 518	15 059	8 367
Laserscanner			
Datensätze	-	21	8
Objektpunkte	-	861 021	589 824
Ergebnisse			
Segmente	50	59	39
Volumen	74,4 m ³	32,4 m ³	13,7 m ³
Oberfläche	140 m ²	94,6 m ²	52,4 m ²

Tab. 1: Übersicht über die durchgeführten Arbeiten an den Saurierskeletten

2. Stereophotogrammetrische Aufnahme

Die Saurierskelette bestehen aus einer Vielzahl einzelner Knochen, deren Lage im Raum und Form bestimmt werden sollte. Wegen des Fehlens klar identifizierbarer Punkte kam nur eine stereophotogrammetrische Vermessung in Frage.

Zur Schaffung von Kontrollinformation wurden jeweils ca. 20 Paßpunkte auf und an dem Objekten mit Styroporkugeln mit ca. 2 cm Durchmesser signalisiert. Diese Punkte wurden von beiden Seiten geodätisch mit einer Genauigkeit von $\pm 1-2$ cm vermessen. Des Weiteren wurden Verknüpfungspunkte in Form von aufgeklebten Papiermarken mit etwa 5 mm Durchmesser signalisiert. Diese wurden nicht geodätisch vermessen und konnten in den Bildern klar identifiziert und präzise angemessen werden.

Der in der Mitte der Saurierhalle des Naturkundemuseums aufgebaute *Brachiosaurus* konnte von zwei Seiten aufgenommen werden. Dabei wurden die Aufnahmen mit der Terrestrischen Meßkamera ZEISS TMK 6 von der Galerie aus gemacht (Abb. 1). Dadurch war es möglich, jede Seite des Sauriers in einem Stereomodell abzubilden. Das gewählte Basis-Höhenverhältnis von ca. 1 : 1 erwies sich jedoch bei der Auswertung als problematisch, da die sich durchdringenden Sichtstrahlen die Stereobetrachtung erheblich erschwerten.

Die Stereoauswertung der beiden Modelle führte zu einem CAD-Drahtmodell (Abb. 2), bestehend aus den Umrißlinien der Knochen bei seitlicher Betrachtung. Aus diesem Grund ist die Aussagekraft der Umrißlinien in anderen Ansichten nur von begrenzter Aussagekraft. Eine Orthogonalprojektion des Datensatzes in eine Vertikalebene entlang der Längsachse des Skeletts war die Grundlage für eine Aufrißzeichnung des Objekts. Aus diesem konnten Phy-



Abb. 1: Meßbild des *Brachiosaurus*, aufgenommen mit der Meßkamera ZEISS TMK 6

siologen eine Vielzahl geometrischer Daten entnehmen (Abb. 3). Des weiteren wurde aus dem CAD-Datensatz ein VRML-Drahtmodell abgeleitet, welches von der Internet-Seite „<http://www.fpk.tu-berlin.de/~albert/dino.html>“ heruntergeladen werden kann.

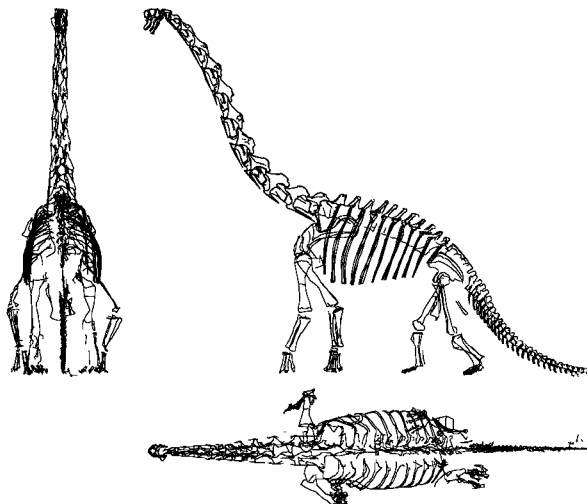


Abb. 2: Auswerteprotokoll des *Brachiosaurus* im Querschnitt, im Längsschnitt und im Grundriß

Im Frühjahr 1997 erfolgte die Vermessung der beiden anderen Sauropoden im Berliner Naturkundemuseum. Aufgrund der beengten räumlichen Verhältnisse waren wir gezwungen den *Diplodocus carnegii* in drei Modellen aufzunehmen. Beim *Dicraeosaurus hansemanni* wurde auf eine Stereoaufnahme der letzten 4 m des Schwanzes verzichtet, da hierbei Aufwand und Ergebnis in einem nicht vertretbaren Verhältnis gestanden hätten. Beide Saurier konnten nur von jeweils einer Seite aufgenommen werden. Bei dieser zweiten Aufnahmekampagne erwies sich der Hintergrund aus Glas als störend bei der Suche nach optimalen Beleuchtungsverhältnissen für die photogrammetrische Bildaufnahme. Immer wieder erschwerten Reflexionen eine ausgewogene Ausleuch-

tung der Szenerie. Insbesondere beim dunkleren *Diplodocus* war es schwierig, Risse und Strukturen auf den Knochen noch in eine Zeichnung auf dem Photomaterial umzusetzen.

Dennoch konnten aufgrund des größeren Bildmaßstabes und des besser geeigneten Basis-Höhen-Verhältnisses noch mehr Details erfaßt werden.

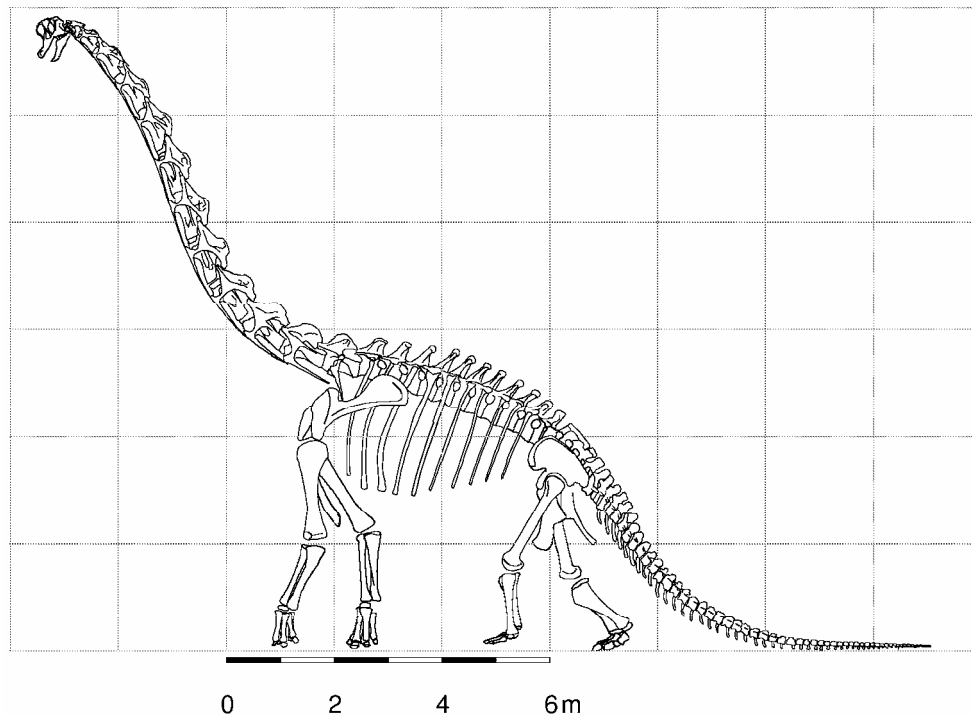


Abb. 3: Längsschnitt durch *Brachiosaurus brancai*, Maßstab etwa 1: 200

3. Laserscanner

Zur Ergänzung der stereophotogrammetrischen Erfassung und zur Evaluierung neuer Technologien wurden die beiden kleineren Saurier zusätzlich mit den beiden Laserscannern (Abb. 4) des Instituts für Navigation (INS) der Universität Stuttgart erfaßt. Bei diesem System wird ein Laserstrahl von zwei beweglichen Spiegeln rasterförmig über ein Raumsegment gelenkt. Neben der Intensität des reflektierten Signals wird auch die Phase zweier aufmodulierter Meßsignale registriert. Aus diesen Phasenmessungen kann der Abstand vom System zum Objektpunkt bestimmt werden. Die beiden Ablenkwinkel und der Objektabstand definieren zusammen einen Satz Polarkoordinaten für die Objektpunkte. Die Intensität des reflektierten Signals liefert eine zusätzliche Information. Abstände und Intensität werden in Rasterdateien gespeichert, wobei der vertikale Ablenkwinkel in Zeilen, der horizontale Ablenkwinkel in Spalten repräsentiert wird. Aus diesen polaren Koordinaten können mit einfachen Formeln kartesische Koordinaten in einem lokalen System berechnet werden (WEHR 1997).



Abb. 4: Laserscanner

Die Erfassung der Skelette erfolgte in Segmenten von 400×400 Objektpunkten bei einem

Öffnungswinkel von etwa $30^\circ \times 30^\circ$ in Azimut und Elevation. Die signalisierten Paßpunkte konnten im Abstands- und im Intensitätsbild identifiziert werden, signalisierte Verknüpfungspunkte nur im Intensitätsbild. Mit Hilfe der geodätisch vermessenen Paßpunkte wurden die einzelnen räumlichen Punkthaufen in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert.

Wie bei der stereophotogrammetrischen Aufnahme erwies es sich auch hier der gläserne Hintergrund als problematisch. Das Lasersignal wurde dort reflektiert, gebeugt oder ungebeugt durchgelassen und von Objekten im Nachbarräum reflektiert. Neben anderen Störungen führte dies zu Meßweiten größer 10 m, wodurch die Eindeutigkeit der längeren Meßweite nicht mehr sichergestellt war. Um dies zu vermeiden, wurden die Glasscheiben mit Papier abgehängt.

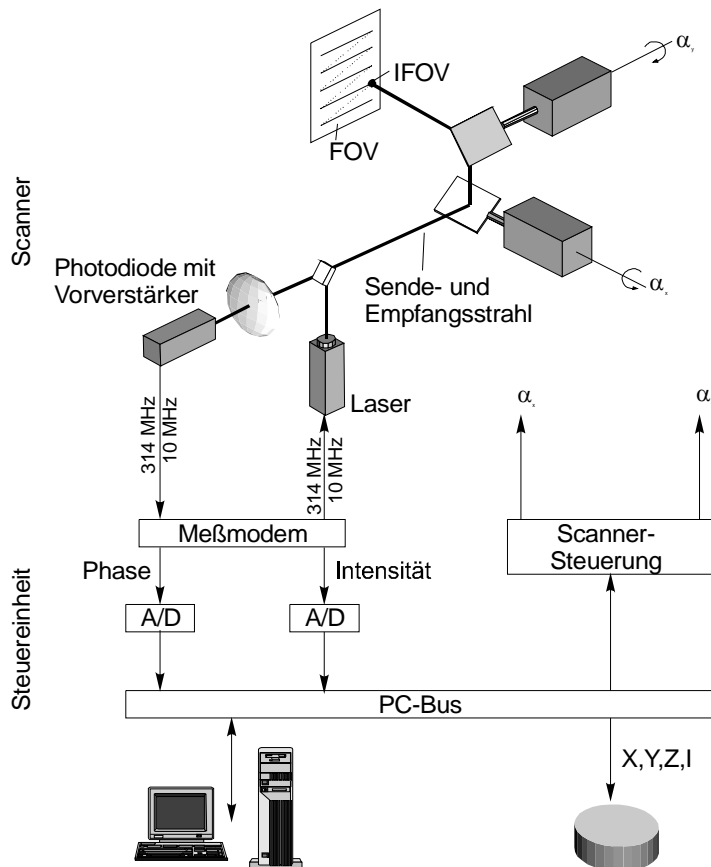


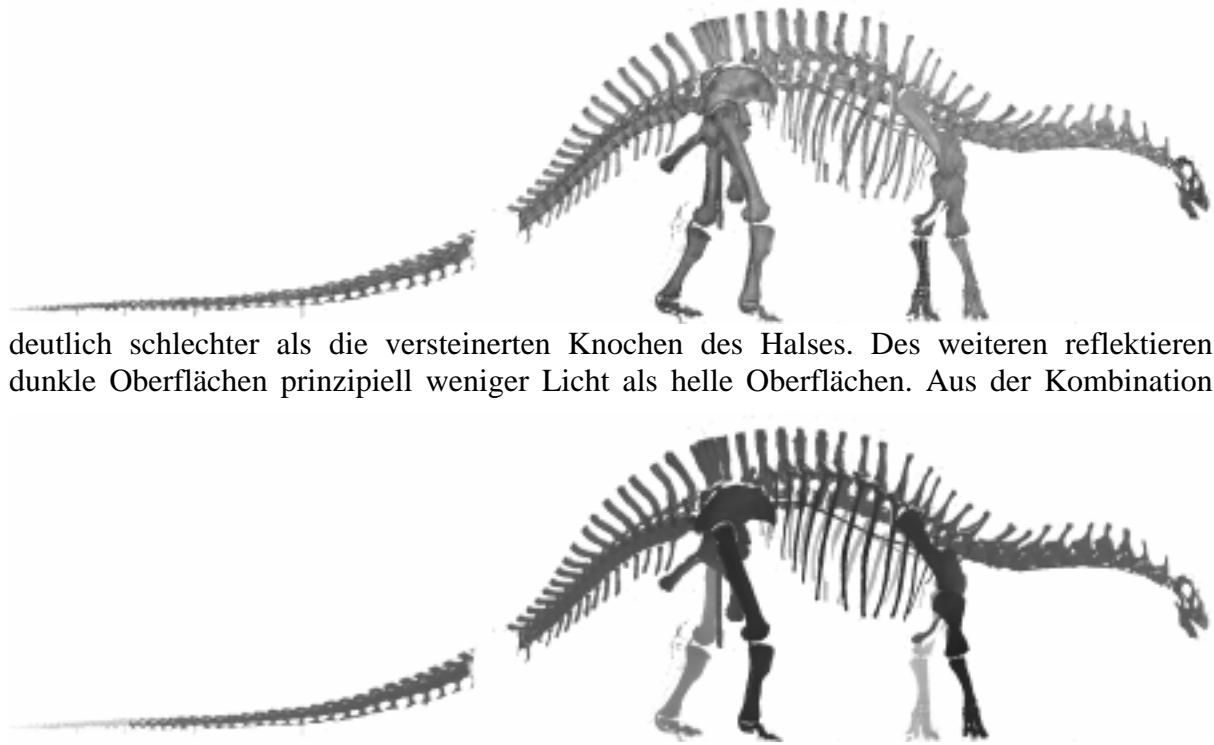
Abb. 5: Prinzipskizze der Laserscanner des Instituts für Navigation

Nach den Messungen wurden die Datensätze der einzelnen Aufstellungen gefiltert und zu Gesamtdatensätzen der beiden Skelette zusammengefügt. Aus diesen konnten dann z.B. die Tiefenkarte und die Orthoprojektion hergeleitet werden (Abb. 6). Die Lücke im Schwanz resultiert aus einer Verdeckung durch eine Vitrine mit einem Saurierei.

Die Intensität des reflektierten Signals ist eine Funktion der Reflexionseigenschaften der Objektoberfläche in Abhängigkeit von der Wellenlänge der Trägerwelle und der Exposition der Fläche gegenüber einfallendem Licht. Wie man an dem dunkleren Schädel des *Dicraeosaurus* (Abb. 6) erkennen kann, reflektiert der Gips die Trägerwelle des Meßsignals

Laserleistung	0,5 mW
Opt. Wellenlänge	670 nm
momentanes Gesichtsfeld IFOV	0,1° (Sendeapertur 1 mm)
gesamtes Gesichtsfeld FOV, variabel	max. $30^\circ \times 30^\circ$
Empfangsapertur	24 mm
Abtastung	2-dim. Linienscan
Pixelanzahl	typ. 200×200 oder 400×400 Pixel
Reichweite	ca. 10 m
Entfernungsmeßgenauigkeit	0,1 mm (für diffus refl. Ziel mit $\delta = 60\%$ und 1 m Entfernung)
Meßtöne	10 MHz, 314 MHz
Meßrate	2 kHz (1-Ton-Messung), 800 Hz (2-Ton-Messung)
Abtastzeit für ein Bild	40 s (200×200 Pixel)

Tab. 2: Technische Daten des Laserscanners



deutlich schlechter als die versteinerten Knochen des Halses. Des weiteren reflektieren dunkle Oberflächen prinzipiell weniger Licht als helle Oberflächen. Aus der Kombination

Abb. 8: Zusammengefügte Punktwolken der 8 Datensätze des *Dicraeosaurus hansemani* im Intensitätsbild (oben) und im grauwertkodierte Abstandsbild (unten)

dieser beider Reflexionseigenschaften resultierten Probleme am *Diplodocus*, bei größerer Reichweite ein für die Messungen ausreichend intensives, reflektiertes Signal zu erhalten. Dank des hellen Staubes auf dem Skelett konnte dennoch gemessen werden, allerdings nur mit einer etwas reduzierten Reichweite, so daß deutlich mehr einzelne Aufstellungen als geplant erforderlich waren.

4. Ergebnisse und Interpretation

Aus den Drahtmodellen der Stereoauswertungen wurden unter Berücksichtigung einer von den Physiologen abgeschätzten Fleischschicht die Parameter räumlicher geometrischer Primitiven hergeleitet, um die Körperformen der Saurier nachzubilden. Es waren dies im wesentlichen Kegelstümpfe und Kugelhappen. Somit ergab sich z.B. für den Rumpf eine faßförmige Gesamtform. Mit Hilfe dieser Primitiven wurde das Volumen und die Oberfläche der Saurier abgeschätzt.

Die Ergebnisse dienen Paläo-Physiologen als Startwerte für die Ermittlung einer Vielzahl weiterer physiologischer Daten (Tab. 3). Diese wiederum ermöglichen Aufschlüsse über die Lebensweise dieser urzeitlichen Riesen.

Körpermasse	[kg]	74 420
Skelettmasse	[kg]	11 480
Körperoberfläche	[m ²]	138.9
Sauerstoffverbrauch	[l h ⁻¹]	3 046
Sauerstoffverbrauch	[l h ⁻¹ kg ⁻¹]	0.041
Lungenvolumen	[l]	5 866
Atemvolumen	[l]	516
Atemfrequenz	[min ⁻¹]	3
Blutmenge	[l]	3 659
Herzgewicht	[kg]	386
Pulsfrequenz	[min ⁻¹]	14.6

Tab. 3: Abgeleitete Daten über *Brachiosaurus brancai* (nach GUNGA et al. 1995)

Zur Bewertung der Ergebnisse muß auf folgende mögliche Fehlerquellen aufmerksam gemacht werden:

1. *Fehlerhafter Aufbau des Skeletts:* Derartige Fehlereinflüsse lassen sich nur durch eine sorgfältige Präparation des Skeletts und einen wissenschaftlich fundierten Aufbau vermeiden. Der Aufbau der Skelette in Berlin gilt als wissenschaftlich fundiert.
2. *Fehlerhafte Vermessung:* Die Ausgleichung der Paßpunktmessung ergab mittlere Fehler von $\pm 1-2$ cm. Bei einem Bildmaßstab von ca. 1 : 100 bis 1 : 200 sind photogrammetrische Ungenauigkeiten im Bereich weniger [mm] zu erwarten. Diese sind damit in der Regel genauer als die Punktdefinition auf dem Skelett.
3. *Annahme der Fleischschicht:* Die Dicke der Fleischschicht war sicherlich auch abhängig vom temporären Angebot an Nahrung und schwankte deshalb beträchtlich. Während der Einfluß auf die Oberfläche zu vernachlässigt werden kann, ist er bei der Berechnung des Volumens jedoch erheblich.
4. *Wahl der verwendeten geometrischen Primitiven:* Sie erscheint im Bereich des Thorax etwas zweifelhaft. Insbesondere wenn man das Skelett des *Brachiosaurus* von oben und von der Seite betrachtet, erkennt man, daß der Rumpf deutlich höher als breit ist (Abb. 2). Dies ist besonders wegen des enormen Anteils des Rumpfes am Gesamtvolumen des Sauriers problematisch. Daher sind neue Berechnungen mit verbesserten geometrischen Annahmen erforderlich.

5. Ausblick

In der nächsten Phase sind die Modelle für die Berechnung der Volumina und Oberflächen zu verbessern. Des weiteren sind die Ergebnisse der Aufnahmen mit Stereophotogrammetrie und Laserscanner gegenüberzustellen. Es zeigte sich bereits, daß die Ergebnisse der Arbeit mit dem Laserscanner schneller verfügbar waren als die Ergebnisse der stereophotogrammetrischen Auswertung. Allerdings müssen die Techniken zur Eliminierung fehlerhafter Messungen aus den Punktwolken der Laserscanner noch verbessert werden. Insbesondere an den Rändern der Knochen wurde eine Entfernung gemessen, welche sich offenbar durch gewichtete Mittelbildung aus Vordergrund (Knochen) und Hintergrund ergab.

Dank

Die Arbeiten im Projekt *Dinosaurier-Lagerstätte Tendaguru* werden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

Gedankt sei hier folgenden Institutionen und Personen: vom Fachgebiet Photogrammetrie und Kartographie der TU Berlin Herrn Prof. JÖRG ALBERTZ für die Beratung und eigenhändige Mitarbeit, Herrn KLAUS WITT für die qualifizierte Unterstützung bei allen Photoarbeiten und den Studenten WOLFRAM LISOWSKI, SASCHA MOKRY und TIM SUTHAU für die mühsamen Stereoauswertungen und Nachbearbeitungen. Gedankt sei Herrn Dipl.-Ing. (FH) MARTIN THOMAS vom Institut für Navigation der Universität Stuttgart für die Bearbeitung und Aufbereitung der Laserscannerdaten. Des weiteren bedanken wir uns bei Dr. med. Dipl.-Geol. HANNS-CHRISTIAN GUNGA und Prof. Dr. med. KARL A. KIRSCH, vom Institut für Physiologie der Freien Universität Berlin, von denen die Initiative zu diesem Projekt ausging, sowie den Mitarbeitern des Museums für Naturkunde der Humboldt-Universität Berlin, insbesondere Prof. Dr. s.c. WOLF-DIETRICH HEINRICH, welche uns den Zugang zu den Skeletten ermöglichten und uns in jeder denkbaren Weise unterstützten.

Literatur:

GUNGA, H.CHR.; K.A. KIRSCH, F. BAARTZ, L. RÖCKER, W.-D. HEINRICH, W. LISOWSKI, A. WIEDEMANN & J. ALBERTZ (1995): New Data on the Dimensions of Brachiosaurus brancai and Their Physiological Implications, Naturwissenschaften, 82, Springer-Verlag, S. 190-192.

NORMAN, D. (1991): Dinosaurier, Goldmann, 352 S.

WEHR, A. (1997): Abbildende Laserscanner – Anwendungen in Bauaufnahme und Denkmalpflege. In: Architekturphotogrammetrie gestern - heute - morgen. Hrsg.: J. Albertz & A. Wiedemann, Technische Universität Berlin, S. 114-127.