

Geomorphometrische Analysen zur Rekonstruktion holozäner Nutzungspotentiale ausgewählter Standorte in der Western Desert (Ägypten)

**Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Universität zu Köln**

**vorgelegt von
Andreas Bolten
aus Mönchengladbach**

Köln, 2007

Berichterstatter: Prof. Dr. U. Radtke

Prof. Dr. O. Bubenzer

Tag der mündlichen Prüfung: 14.02.2008

Kurzzusammenfassung

Die hyperaride und weitgehend vom Menschen unveränderte Western Desert Ägyptens ist ein Hauptuntersuchungsgebiet des interdisziplinär angelegten Sonderforschungsbereichs 389 (ACACIA) und bietet somit ein ideales Feld zur Entwicklung und Prüfung neuer Methoden. In dieser Arbeit wurden erstmalig flächenhafte digitale Höheninformationen in hoher Auflösung für das Untersuchungsgebiet abgeleitet, aufbereitet und hinsichtlich ihrer Qualität und Einsatzmöglichkeiten untersucht. Dabei konnten über die Fragestellung der Arbeit hinaus weitere Einsatzmöglichkeiten zur Beantwortung geomorphologischer und geoarchäologischer Fragestellungen herausgearbeitet werden. Beide Höhenmodelle (ASTER / SRTM-3) zeigen für die jeweilige Auflösung geringe Höhenfehler, sie unterscheiden sich jedoch hinsichtlich ihres nutzbaren Maßstabsbereiches. Hier konnte eine Trennung im Bereich von ca. 1:100.000 festgelegt werden. Während die SRTM-3-Daten durch ihre flächenhafte Verfügbarkeit für großräumige Fragestellungen geeignet sind, fallen die ASTER-Höhendaten in die chorische Maßstabsebene und eignen sich besonders zur Beantwortung regionaler Fragestellungen. Die abgeleiteten methodischen Ergebnisse zum Einsatz und der Überprüfung der Höhendaten können problemlos auf andere aride Räume übertragen werden.

Zur Ableitung holozäner Nutzungspotentiale wurde ein offenes Modell entwickelt, das die spezielle Fragestellung aufgreift, jedoch ebenfalls mit anderen Datensets und in anderen Regionen nutzbar ist. Es beinhaltet die Verknüpfung geomorphometrischer mit anderen raumbezogenen Daten in einem statistischen Verfahren. Die kanonische Korrespondenzanalyse wurde dabei als geeignete statistische Methode vorgestellt, um ein solches Datenset zu analysieren und einen Mehrwert an Information aus den Daten abzuleiten.

Für das holozäne Nutzungspotential der Western Desert konnten durch die Untersuchung zweier archäologischer Fundregionen verschiedene Erkenntnisse gewonnen werden. So ist zeitlich synchron mit einer hygrischen Klimaveränderung zwischen dem Früh- und Mittelholozän von einer veränderten Nutzung der Landschaft durch den Menschen auszugehen. Die Fundposition und das Fundinventar ändert sich hinsichtlich der Lage zur Topographie und zum potentiellen Wasservorkommen.

Somit gibt die vorliegende Arbeit für zukünftige interdisziplinäre Forschungsprojekte wichtige Hinweise für ein mögliches methodisches Vorgehen, gerade im Sinne der interdisziplinär zu bearbeitenden Forschungsfelder, die es im Rahmen der Geomorphologie, Geomorphometrie und Geoarchäologie in Zukunft zu untersuchen gilt.

Abstract

The hyper-arid and extensively human unchanged Western Desert of Egypt is a main investigation area of the interdisciplinary Collaborative Research Centre 389 (ACACIA) and offers an ideal field of generating and verifying new methods. With this Ph.D. thesis for the first time area-wide high-resolution digital elevation models within the investigation area are derived, processed and evaluated concerning to their possible applications and quality. Beyond the aim of the study, further applications in geomorphological questions could be deduced. Depending on their resolution both elevation models (ASTER / SRTM-3) show low vertical errors but differ in the usable scale range. Hence, a division in scale of approx. 1:100,000 could be decided. Whereas the SRTM-3 data are suitable for spacious questions due to their area-wide availability, the ASTER data fall in the chorological scale and are especially suitable for regional studies. The derived methodological findings in using and proving of elevation data can be transferred in other arid areas without difficulties.

For the derivation of Holocene land use potential an open model is presented, which on the one hand took up the special question of the thesis but on the other hand is usable with other data sets and in other regions. It contains the link of geomorphometric and other spatial data in a statistical method. The canonical correspondence analysis (CCA) is a suitable method to analyse such a kind of data set to derive a surplus value of information.

Various findings about the Holocene land use potential of the Western Desert of Egypt could be extracted by the investigation of two archaeological areas. Chronological to a hygric climatic change during the Early- and Mid-Holocene assumes a modified land use of the prehistoric people. The types of artefacts and their situation changed concerning to their topographic position and to the potential water resources.

Therefore, the paper present significant information of methodological approaches for future interdisciplinary research projects in the context of Geomorphology, Geomorphometry and Geoarchaeology.

Die Grundlagen zu dieser Dissertation wurden rückschauend schon früh gelegt. Frau Prof. Besler ermöglichte mir im Frühjahr 2000 als ihre studentische Hilfskraft die Teilnahme an einer interdisziplinären Expedition des SFB 389 in die Große Sandsee. Sie und Olaf Bubenzer haben im *Geographenauto* geduldig alle Fragen beantwortet und die beeindruckende Landschaft dem Studenten näher gebracht. Viele Eindrücke dieser Zeit haben mir später sehr geholfen, mich im ariden Gebiet zurecht zu finden.

Während dieser Expedition sind die Grundlagen zum Teilprojekt E1 des SFB gelegt worden, das zwei Jahre später startete. Olaf Bubenzer gilt hier mein besonderer Dank, zum einen, für sein Vertrauen mich direkt nach dem Examen als Mitarbeiter in dieses Projekt zu holen und zum anderen für die unermüdliche kollegiale Betreuung und die Zeit, die er aufgebracht hat, die vielen Fragen, die in Verbindung mit dieser Arbeit und im Teilprojekt aufgetreten sind mit mir zu diskutieren. Ebenso möchte ich Frank Darius für die unkomplizierte und freundschaftliche Zusammenarbeit im Projekt danken. Auch über Entfernungen hinweg haben wir immer eng und produktiv zusammengearbeitet. Den vielen studentischen Hilfskräften danke ich für die viele Arbeit, die sie in den vielen Jahren des Projektes durchgeführt haben und damit auch ihren Anteil an dieser Arbeit haben.

Prof. Ulrich Radtke möchte ich für die unproblematische Betreuung danken, die Freiheit und die Förderung die er gewährt hat, um mich voll dem Thema und der Arbeit widmen zu können

Schließlich möchte ich meiner Familie und allen Freunden danken, die am Gelingen dieser Arbeit mitgewirkt haben.

Die vorliegende Arbeit ist gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft, den Verantwortlichen möchte ich hiermit ebenfalls danken.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	X
Anhangsverzeichnis	XI
1. Einleitung.....	1
1.1 Fragestellung und Motivation.....	2
1.2 Aufbau der Arbeit	4
2. Definitionen zentraler Begriffe	5
2.1 Digitale Höheninformationen	5
2.1.1 Formen der Aufbereitung und Speicherung digitaler Höheninformationen.....	5
2.1.2 Bezeichnung digitaler Höheninformationen in deutsch- und englischsprachiger Literatur	7
2.2 „Nutzungspotentiale“ – Einbindung in Theorie und Praxis	8
2.2.1 Landschaftsökologie als Basis für die Nutzungspotential-Analyse	8
2.2.2 Konzept des Begriffes „Nutzungspotential“ im Teilprojekt E1 des SFB 389	12
3. Naturräumliche Gegebenheiten des Untersuchungsgebietes	18
3.1 Lage und Topographie	18
3.2 Geologie und Geomorphologie.....	22
3.3 Klima und Klimaentwicklung im Spätpleistozän und Holozän.....	26
4. Methoden und Methodenbeschreibung.....	34
4.1 Datenerfassung und Datenübernahme in einem interdisziplinären Umfeld	34
4.1.1 Daten im Geographischen Informationssystem (GIS)	35
4.1.2 Metadaten.....	37
4.1.3 Einsatz von Projekt- und Fremddaten – einige Beispiele	38

4.1.4 Probleme bei der Erhebung und der Übernahme von Daten	40
4.1.5 Evaluation der Interoperabilität im Teilprojekt E1 des SFB 389	40
4.2 Relieferfassung des Untersuchungsgebietes mit Fernerkundungsdaten ...	41
4.2.1 Grundlagen.....	42
4.2.1.1 Passive Sensoren	42
4.2.1.2 Aktive Sensoren	44
4.2.2 Die Aufnahmesysteme ASTER und SRTM	45
4.2.2.1 Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer' (ASTER)	46
4.2.2.2 ASTER Höhenmodell	51
4.2.2.3 Erzeugung eines ASTER Höhenmodells aus Rohdaten mit PCI Orthoengine 9	53
4.2.2.4 Daten der ,Shuttle Radar Topography Mission' (SRTM)	60
4.3 Geomorphometrie	65
4.3.1 Ableitung geomorphometrischer Parameter für die Nutzungspotential-Analyse.....	70
4.4 Kanonische Korrespondenzanalyse	76
5. Studien zur Nutzbarkeit und Abschätzung der Qualität der Höhendaten .	80
5.1 Rheinisches Schiefergebirge (Deutschland)	83
5.2 Umm Badr (Sudan)	86
5.3 Kunene-Region (Namibia)	87
5.4 Abu Tartur (Ägypten).....	89
5.5 Große Sandsee (Ägypten)	96
5.5.1 Komplexe Dünenmuster	97
5.5.2 Draa und Dünen – Aufbau und Charakteristik	98
5.5.3 Sandmassenabschätzung eines Draa-Abschnittes in der Großen Sandsee	104
5.5.4 Einzugsgebietsanalyse der Großen Sandsee zur Bestimmung von Sandquellen	106
5.6 Zwischenfazit – Relief als Grundlage zur Rekonstruktion holozäner Nutzungspotentiale.....	116

6. Fallstudien zur Ableitung holozäner Nutzungspotentiale	119
6.1 Untersuchungsregionen in der Western Desert.....	120
6.1.1 Djara	124
6.1.2 Regenfeld	126
6.2 Erfassung geomorphometrischer und archäologischer Parameter.....	127
6.2.1 Ableitung geomorphometrischer Parameter aus Höhendaten.....	127
6.2.2 Übernahme archäologischer Daten.....	129
6.3 Statistische Analyse der Datensätze	130
7. Synthese – holozäne Nutzungspotentiale der Western Desert Ägyptens..	136
8. Zusammenfassung und Ausblick.....	139
9. Literaturverzeichnis	141
10. Anhang.....	165

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1:	Mögliche Aufbereitungsformen von digitalen Höhendaten.....	5
Abb. 2-2:	Aufbau eines Höhenrasters mit x-, y- und z-Koordinate	7
Abb. 2-3:	Die Entwicklung der Landschaftsökologie aus den Disziplinen Biologie und Geographie in ihrer zeitlichen Entwicklung und die Aufspaltung in ihre Spezialdisziplinen	9
Abb. 2-4:	Fließdiagramm aus LATHAM & DENIS (1980) (ergänzt). Ableitung eines ‚land potential‘ ausgehend von Geofaktoren und sozioökonomischen Faktoren	14
Abb. 2-5:	Weiterentwickeltes Fließdiagramm aus BOLTEN ET AL. (in press) zur Ableitung von Nutzungspotential-Parametern im Teilprojekt E1 des SFB 389	14
Abb. 2-6:	Fließdiagramm zur Ableitung von holozänen Nutzungspotential-Parametern aus der Geomorphometrie und den Nutzungsmerkmalen des Raumes durch den Menschen.	16
Abb. 3-1:	Die Lage der Western Desert und der Untersuchungsregion des Teilprojektes A1 des SFB 389 sowie der beiden Fundregionen Djara und Regenfeld.....	19
Abb. 3-2:	Die südliche Western Desert dargestellt in KLITZSCH & SCHANDELMEIER (1990)	20
Abb. 3-3:	Höhenschichtenkarte mit den Landschaftsmerkmalen nach EMBABI (2004) zur Eingrenzung der Western Desert	21
Abb. 3-4:	Generalisierte geologische Karte nach USGS (1997)	22
Abb. 3-5:	Geologische Karte der Western Desert. Ausschnitt aus der geologischen Karte Ägyptens 1:2.000.000	24
Abb. 3-6:	Klimadiagramm für die Oase Dakhla nach WALTER & LIETH (1960) und ein Thermoisoplethendiagramm aus den Daten der Klimastation des Grabungshauses in Dakhla	27
Abb. 3-7:	Isolinien gleicher Anzahl an Niederschlagstagen im Jahresmittel berechnet aus Punktdaten von NEW ET AL. (1999)	28
Abb. 3-8:	Ausschnitt von Karte 2 aus GIESSNER (1981).....	30
Abb. 3-9	Zusammenstellung der Klimaentwicklung der Ostsahara im Jungquartär.....	31
Abb. 3-10:	Klimagesteuerte Besiedlungsgeschichte der Ostsahara während der Hauptphasen des Holozän (nach KUPER & KRÖPELIN 2006)	32
Abb. 4-1:	Integration interner und externer Daten in die Projektdatenbank des Teilprojektes E1 des SFB 389	35

Abb. 4-2: Ausschnitt aus einer Routenkarte des Tschad mit eingetragenen Datenpunkten des ‚GEOnet Names Server‘	39
Abb. 4-3: Überblick über die Globalstrahlung der Sonne auf der Erdoberfläche mit ihrer Durchlässigkeit durch die Atmosphäre in Abhängigkeit von der Wellenlänge	43
Abb. 4-4: Ausschnitt aus dem elektromagnetischen Spektrum mit den für das menschliche Auge sichtbaren Wellenlängenbereichen.....	44
Abb. 4-5: Der TERRA-Satellit in einer Bildmontage mit den einzelnen Instrumenten.....	46
Abb. 4-6: Schematische Darstellung der drei Aufnahmesysteme des ASTER-Systems	49
Abb. 4-7: Zwischenbilder bei der Erzeugung von ASTER-Höhenmodellen	50
Abb. 4-8: Level 1A-Datenaufbau einer ASTER-Szene.....	55
Abb. 4-9: Entnehmen einzelner Kanäle oder Kanalgruppen aus einer ASTER L1A-Datei und die Definition einer Eingabe- und Ausgabeprojektion in PCI Orthoengine	55
Abb. 4-10: Prozess der Erfassung von Ankerpunkten	56
Abb. 4-11: Dialog in PCI-Orthoengine zur Erzeugung von Epipolarbildern.....	58
Abb. 4-12: Epipolarbilder nach der Erzeugung in PCI-Orthoengine	58
Abb. 4-13: Eingabemodul zur Erzeugung des abschließenden Höhenmodells aus Epipolarbildern mit PCI-Orthoengine	59
Abb. 4-14: Bild des erzeugten Höhenmodells.....	59
Abb. 4-15: Montage des Messaufbaus bestehend aus dem Shuttle und einem 20 m langen Mast mit weiteren Messanlagen	60
Abb. 4-16: Die Abdeckung der SRTM X-Band Daten für Teile von Nord-Afrika und den Nahen Osten.....	61
Abb. 4-17: SRTM-Rohdaten aus der Großen Sandsee an der ägyptisch-libyschen Grenze	64
Abb. 4-18: Korrigierte SRTM-Daten derselben Region dargestellt in Abbildung 4-17	64
Abb. 4-19: Disziplingefüge um die Geomorphometrie	66
Abb. 4-20: Zusammenhang von Punkt, Objekt und Struktur	68
Abb. 4-21: Standardmatrix mit Bezeichnung der einzelnen Höhenpunkte 1-9, des Abstands h und der Berechnungsrichtung x und y	70
Abb. 4-22: Zusammenhang zwischen Höhenmodell, ‚Flow-direction‘ (Abflussrichtung), und ‚Flow-accumulation‘ (Abflussmenge).....	72

Abb. 4-23: Schematische Darstellung zur Trennung von ‚upland‘ (Hochland) und ‚lowland‘ (Tiefland)	75
Abb. 4-24: Schematische Darstellung zur Bestimmung der günstigsten Verbindung zur nächsten Drainagelinie abhängig von der Hangneigung	75
Abb. 4-25: Beispiel eines Biplots.....	78
Abb. 5-1: ASTER-, SRTM-3- und DGM 50-Daten im rheinischen Schiefergebirge.....	83
Abb. 5-2: Ausschnitt der Region Umm Badr (Sudan) nach einer geomorphologischen Karte aus JÄKEL & RÜCKERT (1998)	86
Abb. 5-3: Klassifikation der Landschaft in der Kunene-Region in Weidetypen ausgehen von einem ASTER-Höhenmodell	88
Abb. 5-4: Das Abu Tartur Plateau fotografiert von der Oase Dakhla	89
Abb. 5-5: Das Abu Tartur Plateau in einer 3D-Ansicht.....	90
Abb. 5-6: Profilverlauf der Höhenmodelle ASTER und SRTM-3 am Abu Tartur-Plateau	91
Abb. 5-7: Ausschnitt des Abu Tartur Plateaus	92
Abb. 5-8: Hypothetische Drainagenetz eines Teilbereiches des Abu Tartur Plateaus ermittelt aus beiden Höhenmodellen	93
Abb. 5-9: Detailregion aus Abbildung 5-8. Dargestellt sind Höhenschichten der Region aus dem ASTER-Höhenmodell (Für das Gebiet ergibt sich eine durchschnittliche Hangneigung von nur etwa 0,15°)	93
Abb. 5-10: Das berechnete Einzugsgebiet für die Playaregion im östlichen Vorland des Plateaus	95
Abb. 5-11: Das Satellitenbild zeigt einen kleinen Ausschnitt aus dem Vorland des Abu Tartur Plateaus (markiert in Abb. 5-10)	95
Abb. 5-12: Komplexes Dünensystem in Mauretanien 100 km nördlich von Nouakchott.....	97
Abb. 5-13: (a) Dünenkamm einer Draa-Dünen-Kombination der Großen Sandsee. Am Horizont sind weitere Dünenzüge zu erkennen (eigene Aufnahme im März 2000). (b) Satellitenaufnahme einer anderen Region der Großen Sandsee mit vergleichbaren Longitudinaldünen.....	98
Abb. 5-14: Schematisches Modell der Windregime und Landschaftsentwicklung der südlichen Großen Sandsee (Ägypten) seit dem letzten glazialen Maximum.....	99
Abb. 5-15: Abfahrt an der Ostflanke einer Draa im mittleren Teil der Großen Sandsee bei etwa 25°N mit ungefährer Neigungsbestimmung von mehr als 25°	101

Abb. 5-16: Ende einer holozänen Longitudinaldüne in der südlichen Großen Sandsee.....	101
Abb. 5-17: Überblick über einen Teil der südlichen Großen Sandsee.....	102
Abb. 5-18: Vergleichsgebiet (mit Stern markiert) in der südlichen Namib (Namibia).....	103
Abb. 5-19: ASTER-Höhenmodell aus dem Gebiet der südlichen Namib (Namibia)	104
Abb. 5-20: Volumenabschätzung einer 12,5 km langen Draa-Dünen-Kombination der südlichen Großen Sandsee mittels ASTER-Höhendaten	105
Abb. 5-21: Ägypten im SRTM-3-Modell. Markiert sind die großen zusammenhängenden 'no-data'-Bereiche, die vor allem in der Großen Sandsee liegen	108
Abb. 5-22: Füllen des SRTM-3-Modells in der Großen Sandsee mit ASTER-Höhendaten.....	109
Abb. 5-23: Bestimmung des Abweichungskoeffizienten für die ASTER-Szene 1668 gegenüber dem SRTM-3-Modell.....	110
Abb. 5-24: Identifikation von Longitudinaldünen über einen topographischen Index (vgl. Kap 4.3, Abb. 4-23)	112
Abb. 5-25: Beispieldiagramm zur Berechnung eines unbekannten Höhenwertes aus den umliegenden Pixeln mittels des IDW-Verfahrens	113
Abb. 5-26: Neu erstelltes Höhenmodell nach Entfernung der Longitudinaldünen und Interpolation der Leerräume.....	115
Abb. 5-27: Die neu berechneten Einzugsgebiete und das dazugehörige Drainagenetz überlagert über ein Satellitenbild (Landsat 7)	115
Abb. 6-1a: Die Regionen Djara (rechts) mit gut zu erkennbarer Fahrspur in der rechten Bildhälfte) und die Umgebung von Regenfeld (ca. 30 km entfernt von der eigentlichen Fundregion) im QuickBird-Satellitenbild	121
Abb. 6-1b: Fotos, die die typische unterschiedliche Landschaftssituation der Regionen wiedergeben und vergleichbar sind mit den Satellitenbildern in Abb. 6-1a	121
Abb. 6-2: Die archäologischen Fundregionen Djara (oben) und Regenfeld (rechts) im ASTER-Satellitenbild gleichen Maßstabs.	122
Abb. 6-3: Geologische Formationen nach KLITZSCH ET AL. (1987) für die Fundregionen Djara und Regenfeld (beide Berechnungsregionen sind mit ihren Fundplätzen (weiße Punkte) dargestellt)	123
Abb. 6-4: Ausschnitt aus der Fundregion Djara	125

Abb. 6-5: Ausschnitt aus der Fundregion Regenfeld	126
Abb. 6-6: Häufigkeitsdiagramme zum TOPO-Index	131
Abb. 6-7: Häufigkeitsdiagramme zum HYDRO-Index	132
Abb. 6-8: Ausschnitt aus der Untersuchungsregion Djara, die den Zusammenhang zwischen der Lage der Fundplätze und der günstigsten Verbindung zur Drainagelinie in Abhängigkeit von der Hangneigung	133
Abb. 6-9: Biplot, das den Zusammenhang zwischen HYDRO- und TOPO-Index und der Zeitstellung der Fundregionen verdeutlicht	133
Abb. 7-1: Karte der bedeutenden Fundregionen in der Western Desert Ägyptens, die für weitere Untersuchungen in Frage kommen	137

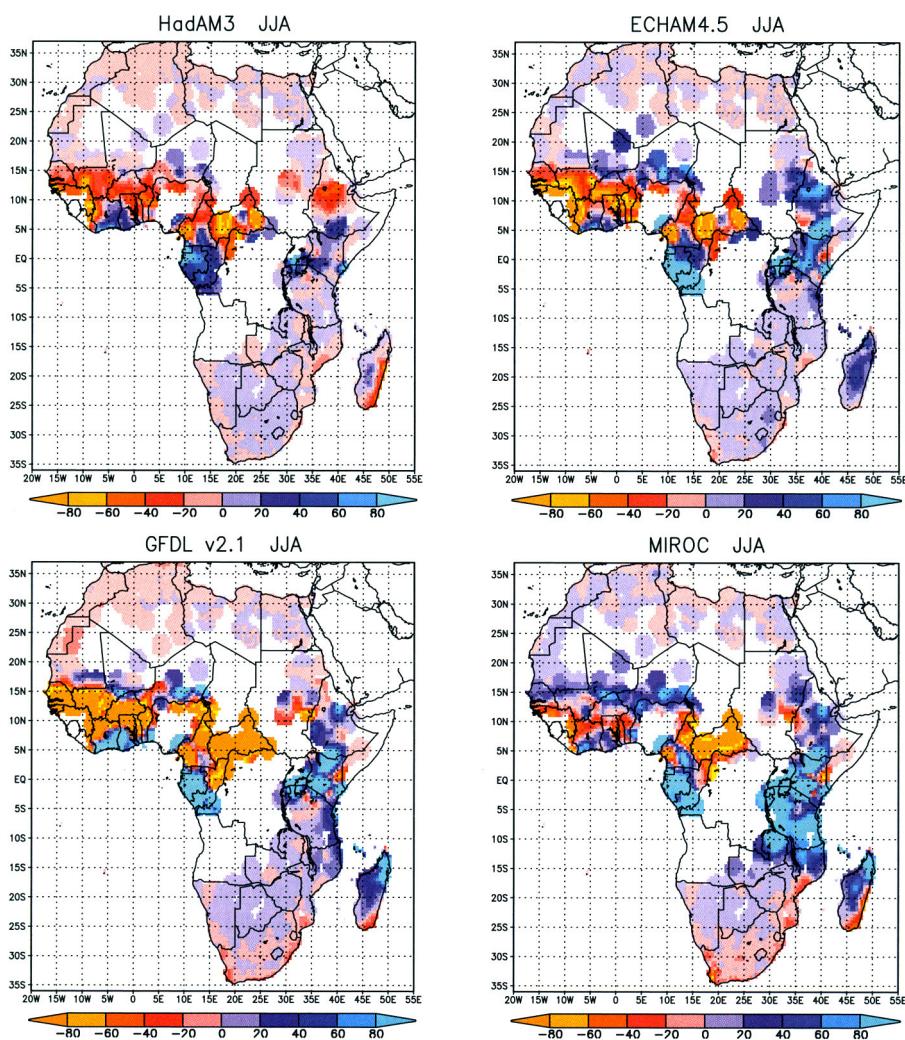
Tabellenverzeichnis

Tab. 4-1: Ausschnitt aus dem Fahrtenbuch (Teilprojekt A1, SFB 389) mit einigen Attributspalten (Auswahl).....	38
Tab. 4-2: Zusammenstellung hochauflösender flächenhaft verfügbarer kostenloser digitaler Höhenmodelle mit einigen Charakteristika	45
Tab. 4-3: Aufnahmesysteme der TERRA-Satelliten mit einigen Eigenschaften	47
Tab. 4-4: Basisdaten des ASTER-Aufnahmesystems.....	49
Tab. 4-5: Grundlagenliteratur zu ASTER-Daten	52
Tab. 4-6: Ausgewählte Literaturangaben zu Felduntersuchungen mit Spektralkanälen der ASTER-Daten.....	52
Tab. 4-7: Ausgewählte Literaturangaben zum Einsatz von ASTER-Höhendaten in Felduntersuchungen	53
Tab. 4-8: Orometrische Einteilung nach SONKLAR (1873)	67
Tab. 4-9: Zusammenstellung erster mathematisch eindeutig beschriebener geomorphometrischer Einzelemente nach SOHLBACH (1978)	67
Tab. 4-10: Zusammenstellung verschiedener Parameterstufen nach SCHMIDT & DIKAU (1999)	69
Tab. 5-1: Zusammenstellung der Fehlerabschätzungen zu ASTER- und SRTM-3-Höhendaten	81
Tab. 5-2: Klassengrenzen zu den einzelnen Weidemanagementtypen abgeleitet aus Geländebefunden.....	88
Tab. 5-3: Berechnungsdaten zu Abbildung 5-40 und der angegebenen Formeln zur IDW-Methode für unterschiedliche Gewichtungswerte.....	114
Tab. 6-1: Geowissenschaftliche Parameter mit ihren Beschreibungen und Einheiten	128
Tab. 6-2: Archäologische Parameter für die Fundregionen Djara und Regenfeld	129

Anhangsverzeichnis

Anhang I	Karte zur Verortung einzelner Abbildungen in der Western Desert Ägyptens	165
Anhang II	Rohdaten zur Fundregion Djara	166
Anhang III	Rohdaten zur Fundregion Regenfeld.....	177

„Africa is one of the most vulnerable continents to climate variability and change because of multiple stresses and low adaptive capacity.“ (IPCC report 2007)



Modelle der Veränderung des mittleren monatlichen Niederschlags für Afrika. Abgeleitet aus Stationsdaten und projiziert auf den Zeitraum 2080-2099 (IPCC science basis, SOLOMON ET AL. 2007).

1. Einleitung

Die vorliegende Dissertation wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs (SFB) 389 *Kultur- und Landschaftswandel im ariden Afrika: Entwicklungsprozesse unter ökologischen Grenzbedingungen* (ACACIA) angefertigt. Der SFB wird seit 1995 bis 2007 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert und umfasst im letzten Antragszeitraum sechzehn interdisziplinäre Teilprojekte. Das Teilprojekt E1 *GIS-gestützter Atlas holozäner Nutzungspotentiale ausgewählter Arbeitsgebiete* unter der Leitung von O. Bubenzer beschäftigt sich u.a. mit der Synthese der Daten einzelner Teilprojekte und bildet das theoretische Gerüst für die vorliegende Arbeit. Ein Ziel des Projektes ist die Darstellung des holozänen Nutzungspotentials ausgewählter, für die Klima- und Besiedlungsgeschichte besonders aussagekräftiger Regionen. Im Vorwort und ersten Kapitel des *Atlas of Cultural and Environmental Change in Arid Africa* (BUBENZER ET AL. 2007) umreißen die Autoren rückschauend die Fragestellungen und Ziele des SFB 389, die auch der vorliegenden Arbeit den äußeren Rahmen geben. Darin heißt es u.a.: *Die Untersuchungsgebiete sind geprägt von Anpassungsstrategien der Menschen in einer sich verändernden Umwelt. Wasserverfügbarkeit bildet dabei vor allem in der Ost-sahara einen der wichtigsten Faktoren. Der hygrische Klimawandel des Holozäns veränderte die Landschaft und führte zu angepassten Wirtschaftsformen und neuen Technologien, setzte jedoch auch großräumige Wanderungen in Gang* (KUPER ET AL. 2007). Nicht nur in der Vergangenheit stand der Raum vor klimatischen Veränderungen, auch aktuell ist der afrikanische Kontinent laut IPCC-Bericht 2007 einer der am stärksten betroffenen Kontinente des anthropogen beeinflussten Klimawandels (vgl. nebenstehende Abbildung und SOLOMON ET AL. 2007).

In der Forschungsgeschichte des Raumes, der heute außerhalb der Oasen durch extreme Trockenheit und Lebensfeindlichkeit geprägte ist, stellt das Thema *Wasser und seine Verfügbarkeit* ein Klammerfunktion dar. Das Kölner Projekt *Besiedlungsgeschichte der Ostsahara* (B.O.S.) bearbeitete im Zeitraum von 1980-1993 archäologische Fragestellungen (KUPER 1995) und legt damit wissenschaftliche Grundlagen für weitere deutsche Großforschungsprojekte. Der Berliner Sonderforschungsbereich 69 *Geowissenschaftliche Probleme in ariden und semiariden Gebieten* beschäftigte sich von 1981-1995 besonders mit geowissenschaftlichen Fragen und der kartographischen Erfassung des Gebietes in vielfältigen topographischen und thematischen Karten (z.B.

ALAILY 1993, MEISSNER & RIPKE 1993). Das Forschungsthema *Wasser* findet sich hier in der klimahistorischen Betrachtung aber auch in den Forschungen zu den aktuellen Grundwasserressourcen des Gebietes wieder. Dabei spielten existenzielle Fragen der Zukunftsplanung Ägyptens ebenfalls eine Rolle (KLITZSCH & THORWEIHE 1999). Der Kölner Sonderforschungsbereich 389 untersucht den Raum mit den Fachrichtungen Afrikanistik, Botanik, Ethnologie, Geschichte, Linguistik, Geographie sowie Ur- und Frühgeschichte und verfolgt einen interdisziplinären Ansatz, der sich mit zwei ariden Großräumen beschäftigt. Neben der Ostsahara steht Namibia mit den angrenzenden Ländern im Fokus der Untersuchungen. Dabei wird der *Kultur- und Landschaftswandel im ariden Afrika* untersucht und transkontinental verglichen.

Die Besiedlungsgeschichte der Western Desert Ägyptens ist geprägt durch die Klimaveränderungen seit dem Spätpleistozän. Zu Zeiten des holozänen Klimaoptimums war die Nutzung des damaligen *Wüstenrandes* durch den prähistorischen Menschen und dadurch sein Überleben möglich, bevor der natürlicher Klimawandel die Landschaft in eine Vollwüste veränderte (NEUMANN 1989). Auch in der heutigen Zeit des anthropogen beeinflussten Klimawandels reagieren die Wüstenränder besonders sensiv (GOUDIE 1991, EITEL ET AL. 2005, 2006, SRIVASTAVA ET AL. 2005); sei es durch Wiederbegrünung oder Austrocknung.

1.1 Fragestellung und Motivation

Im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit stehen die Erfassung und die Analyse des Reliefs der Western Desert Ägyptens sowie die Entwicklung und Anwendung geeigneter Methoden zur Ableitung von Informationen über das Nutzungspotential der holozänen Landschaft. Flächenhafte digitale Höhendaten für die Untersuchungsregion in einer geeigneten Genauigkeit und Qualität lagen bislang nicht vor, sondern müssen zunächst abgeleitet bzw. aufbereitet und evaluiert werden, um sie im Sinne der Fragestellung geomorphometrisch analysieren zu können.

Der heute außerhalb der Oasen menschenleere und lebensfeindliche Raum der Western Desert Ägyptens ist von den Menschen zu Zeiten des holozänen Klimaoptimums durchquert und genutzt worden. Archäologische, botanische und zoologische

Hinterlassenschaften dieses Nutzens sind heute in der Landschaft zu finden. Im Rahmen der Forschungsarbeit des SFB 389 stellen sich die Fragen, warum bestimmte Regionen häufiger aufgesucht wurden als andere, welchen Nutzen diese Regionen für den Menschen hatten oder warum große Teile der Western Desert fundleer sind. Lassen sich aus den archäologischen Funden auf der Basis des aktuellen Reliefs Hinweise auf das vorzeitliche Nutzungspotential gewinnen und wie können die gewöhnlichen punkthaften Informationen flächenhaft dargestellt werden? Diese Fragen und mögliche Forschungsmethoden wurden im Frühjahr des Jahres 2000 während einer interdisziplinär ausgerichteten Forschungsexpedition in der Großen Sandsee immer wieder intensiv zwischen Archäologen, Botanikern und Geographen diskutiert und werden u.a. im Teilprojekt E1 des SFB 389 bearbeitet. Die vorliegende Arbeit ist ein Ergebnis dieses Teilprojekts und leistet einen Beitrag zu *geomorphometrischen Analysen zur Rekonstruktion holozäner Nutzungspotentiale ausgewählter Standorte in der Western Desert.*

Viele Indizien sprechen dafür, dass das Relief von heute – abgesehen von rezenten Veränderungen wie Akkumulation und Deflation von Sand, fluvialer Erosion und Senkenfüllungen – dem Relief von damals gleicht. Es bildet somit ein verbindendes Element in die Vergangenheit, wobei die Geomorphometrie als Analysewerkzeug dient. Eine möglichst genaue interdisziplinäre Aufnahme der rezenten Landschaft ist erforderlich, um aus den autochthonen Daten Hinweise über das holozäne Nutzungspotential des Raumes zu erfahren. Die Datenverarbeitung und -analyse solcher heterogener, interdisziplinär gewonnener Daten ist noch wenig erforscht. Es existieren z.B. keine universellen Werkzeuge für die Analyse dieser Daten. Im interdisziplinären SFB 389 bieten sich ideale Möglichkeiten, neue Methoden zu generieren und anzuwenden. In diesem Zusammenhang wird ein neues offenes Modell vorgestellt, das eine Parameterverknüpfung aus morphometrischen und archäologischen Daten vorstellt, die mittels einer statistischen Analyse Hinweise auf Abhängigkeiten zwischen den Daten aufzeigt.

Bislang veröffentlichte Kartenwerke, die sich mit Einzelaspekten des Nutzungspotentials nordostafrikanischer Landschaften befassen, liegen bisher nur als Übersichts-

darstellungen in entsprechend kleinem Maßstab vor (z.B. GIESSNER 1985, SCHANDEL-MEIER ET AL. 1993, MEISSNER & WYCISK 1993).

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in die Kapitelthemen Theorie, Untersuchungsraum, Methoden, Evaluation, Analyse und Synthese. Der Bereich Theorie gibt eine Einführung zu zentralen Begriffen. Hier wird das Konzept des Nutzungspotentials im Sinne des Teilprojekts E1 des SFB 389 sowie die Einbindung in die Theorie der Landschaftsökologie vorgestellt. Das Untersuchungsgebiet wird mit seinen entscheidenden naturräumlichen Haupteinheiten und der Klimaentwicklung seit dem Spätpleistozän vorgestellt. Der Bereich Methoden beschäftigt sich u.a. mit der Erfassung des Reliefs in digitalen Höhenmodellen und der Ableitung von Parametern mit Hilfe der Geomorphometrie. Die Evaluation bewertet die Nutzbarkeit und Qualität der digitalen Höhenmodelle und zeigt deren Einsatzmöglichkeiten und Grenzen auf. Mit der Analyse werden zwei Fundregionen des Untersuchungsgebietes mit den vorgestellten Methoden untersucht. In der Synthese werden die Ergebnisse auf die Region der Western Desert Ägyptens übertragen.

Zur vereinfachten Handhabung dieser Arbeit ist mit Anhang I eine ausklappbare Karte beigefügt, die einzelne Abbildungen dieser Arbeit in der Western Desert Ägyptens verortet.

2. Definitionen zentraler Begriffe

Im Folgenden werden zwei zentrale Begriffe der vorliegenden Arbeit näher erläutert. Zum einen der Begriff der digitalen Höheninformation und zum anderen der Begriff des Nutzungspotentials eingebunden in die Theorie der Landschaftsökologie.

2.1 Digitale Höheninformationen

Digitale Höheninformationen sind digitale Daten über die mittlere Höhe einer definierten Fläche der Erdoberfläche. Diese Daten sind bezogen auf eine andere Höhe (meist über dem Meeresspiegel), die aufbereitet für die Verarbeitung mit einem Computer vorliegen (CAMPBELL 1996, LILLESAND ET AL. 2004).

2.1.1 Formen der Aufbereitung und Speicherung digitaler Höheninformationen

Für die weitere Bearbeitung digitaler Höhendaten stehen drei verschiedene Darstellungsformen zur Verfügung (WILSON & GALLANT 2000; Abb. 2-1):

- In einem regelmäßigen Raster aus Quadraten oder Rechtecken, die jeweils einen Höhenpunkt repräsentieren (Abb. 2-1a).
- Als ein so genanntes ‚Triangulated Irregular Network‘ (TIN). Das TIN ist ein Netzwerk aus Höhenpunkten, die über Kanten verbunden werden. Dadurch entstehen Dreiecke, die eine Fläche ohne Unterbrechung abdecken (Abb. 2-1b).
- Als Konturlinien mit Orthogonallinien, denen jeweils eine feste Höhe zugeordnet ist (Abb. 2-1c).

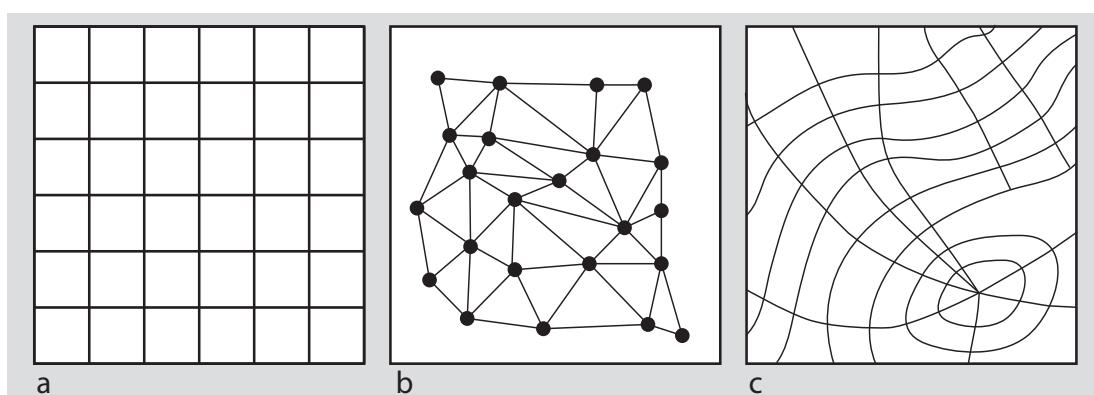


Abb. 2-1: Mögliche Aufbereitungsformen von digitalen Höhendaten. (a) Rasterdaten, (b) ‚Triangulated Irregular Network‘ und (c) Konturlinien mit Orthogonallinien. (eigener Entwurf)

Alle drei Methoden haben Vor- und Nachteile sowie typische Einsatzgebiete, die von der Fragestellung und der weiteren Verarbeitung der Höhendaten abhängen.

- Rasterdaten sind aufgrund der einfachen Handhabung und der Tatsache, dass die meisten digitalen Höhendaten aus Bildern (ebenfalls Rasterdaten) abgeleitet werden am weitesten verbreitet. Demgegenüber stehen jedoch drei Nachteile. Erstens, Rasterdaten sind sehr speicherintensiv; bei geringer Pixelgröße (s. Abb. 2-2) ergeben sich so enorme Datenmengen. Zweitens, die statische Größe der Pixel kann abrupte Höhenänderungen nicht erfassen. Drittens, die Berechnung hydrologischer Parameter können aufgrund der quadratischen Pixel ungenau werden (Linien erhalten ein Zigzag-Muster entlang der Pixelgrenzen) (WILSON & GALLANT 2000). Der erste Nachteil stellt aufgrund der heutigen Verarbeitungsgeschwindigkeit und Datenspeicherungsmöglichkeiten kein Problem mehr dar. Die beiden anderen Nachteile können durch möglichst kleine Pixelgrößen und optimale Algorithmen und Interpolationsverfahren minimiert werden.
- TINs eignen sich besonders zur Darstellung von diskontinuierlichem Relief, das eine starke Reliefenergie und Hangneigungsänderungen aufweist. Aufgrund der Einbindung von Tiefenlinien eignet es sich besonders für den Einsatz zu hydrologischen Fragestellungen, aber auch z.B. zur Bestimmung der Rauigkeit eines Geländes (hier ändert sich die Anzahl und Größe der einzelnen Dreiecke stark) (WILSON & GALLANT 2000). Nachteilig wirkt sich die speicher- und leistungsintensive Darstellung und Abspeicherung der Daten aus, sodass nur kleine Gebiete praktikabel als TIN nutzbar sind.
- Konturlinien in Verbindung mit Orthogonallinien werden für hydrologische Fragestellungen genutzt. Das Höhenmodell wird in kleine Höhen-Polygone unterteilt, die einzeln in Algorithmen berechnet werden können (WILSON & GALLANT 2000). Nachteilig ist das insgesamt ungenaue Höhenmodell, da Zwischenwerte nur schlecht erfasst werden.

Insgesamt bieten die Rasterdaten ausgewogene Eigenschaften zwischen Handhabbarkeit und Genauigkeit und werden aus diesem Grund – wie auch in der vorliegenden Arbeit – am häufigsten eingesetzt.

2.1.2 Bezeichnung digitaler Höheninformationen in deutsch- und englischsprachiger Literatur

Für die Nutzung des Datensystems, in dem x -, y - und z -Koordinaten der Landoberfläche abgespeichert werden, nutzen deutsch- und englischsprachige Literatur inkonsistent verschiedene Begriffe. So findet man gleichwertig unter anderem die Begriffe *digitales Geländemodell* (DGM), *digitales Höhenmodell* (DHM), *digitales Oberflächenmodell* (DOM), *,digital elevation model'* (DEM) oder *,digital terrain model'* (DTM) (erstmals im englischsprachigen Raum von MILLER & LAFLAMME (1958) genutzt). Diese Begriffe bezeichnen in der überwiegenden Zahl der Veröffentlichungen das Gleiche: Es werden x - und y -Koordinaten als Mittelpunkt eines Quadrates (Pixel) mit fester Kantenlänge (‘cellsize’) angegeben (bspw. 30 m) und zusätzlich eine z -Koordinate, die die gemittelte Höhe innerhalb dieses Quadrates angibt (in seltenen Fällen werden auch nicht quadratische Pixel genutzt) (Abb. 2-2).

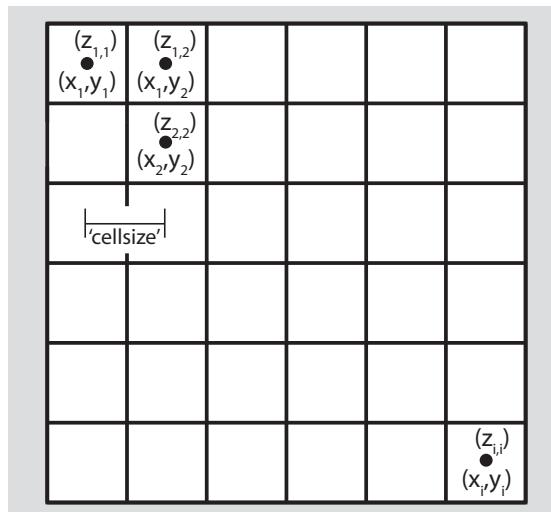


Abb. 2-2: Aufbau eines Höhenrasters mit x -, y - und z -Koordinate. Die Koordinaten x und y geben die Position des Mittelpunktes der Zelle und z die gemittelte Höhe über die ganze Zelle am Mittelpunkt wieder. Die ‘cellsize’ (oder Auflösung) gibt den Abstand der einzelnen Mittelpunkte der Zellen an. Der Abstand ist gewöhnlich für die x - und y -Koordinate gleich. Bei der Projektion eines Rasters auf die Erdoberfläche treten aber auch nicht gleich große Abstände für x und y auf.

Unbestritten bezeichnen die Abkürzungen DHM und DEM diese Art der Datenangabe. Die Bezeichnungen DGM und DTM können nur verwandt werden, wenn Zusatzinformationen über das Gelände mit im Datensatz vorhanden sind. Dies sind Daten, die die Beziehungen der Pixel untereinander beschreiben, z.B. die Stärke des Gradienten zwischen zwei Höhenangaben der Pixel, woraus sich schließen lässt, ob es sich um einen steilen Hang oder um eine Steilwand handelt. Solche Angaben zur

Reliefanalyse finden sich in einigen Geographischen Informationssystemen (GIS) und speziellen Computerprogrammen, die neben Höheninformationen auch Geländeinformationen angeben (z.B. die Hangform: SAGA 2007). Das DOM beschreibt in bebautem und mit Vegetation bedecktem Gebiet nicht die Höhe des Erdbodens, sondern die Höhe der Oberfläche der über der Erde befindlichen natürlichen und künstlichen Objekte (vgl. Kap. 5.1). Weitere Informationen zu dieser Problematik und den unterschiedlichen Modellen gibt z.B. KRAUS (2004).

2.2 „Nutzungspotentiale“ – Einbindung in Theorie und Praxis

Das Nutzungspotential oder die Analyse von Nutzungspotentialen einer Landschaft lässt sich in die Theorie der Landschaftsökologie einbinden.

Um die Stellung der Nutzungspotential-Analyse innerhalb der Landschaftsökologie zu beleuchten, wird zunächst die Landschaftsökologie selbst mit ihrer historischen Entwicklung und den Arbeitsfeldern näher beschrieben.

2.2.1 Landschaftsökologie als Basis für die Nutzungspotential-Analyse

Zum Verständnis der Landschaftsökologie existiert eine Fülle unterschiedlicher Definitionen (z.B. WU & HOBBS 2007a), die sich jedoch in ihrem Kern auf die Theorie von Carl Troll zurückführen lassen. TROLL (1939) bezeichnet die Landschaftsökologie „als das Studium des gesamten in einem bestimmten Landschaftsausschnitt herrschenden komplexen Wirkgefüges zwischen den Lebensgemeinschaften und ihren Umweltbedingungen“.

Das Untersuchungsobjekt der komplexen physischen Geographie oder Landschaftsökologie (TROLL 1939, 1966) ist dabei die Erdoberfläche (v. RICHTHOFEN 1877, PENCK, 1894), die als ein dreidimensionales Gefüge aus Lithosphäre, Atmosphäre und Hydrosphäre, sowie der Biosphäre, die sich innerhalb der anderen entwickelt, zu verstehen ist (GARDNER 1977, LESER & MOSIMANN 1997).

Mit der Fortführung der Forschung in der Landschaftsökologie und der Einbeziehung des Begriffes in vielfältigen Kontexten lässt sich die Bezeichnung heute nicht mehr eindeutig einer Disziplin zuordnen und wird sogar oftmals nur als „a useful

badge to help someone sell a „product“ (LESER 2007) benutzt. LESER (2007) stellt ein Schaubild zur Entwicklung der Landschaftsökologie vor, das die Wurzeln, die in der Biologie und Geographie liegen, und die heutige Vielfältigkeit des Fachs wiedergibt (Abb. 2-3).

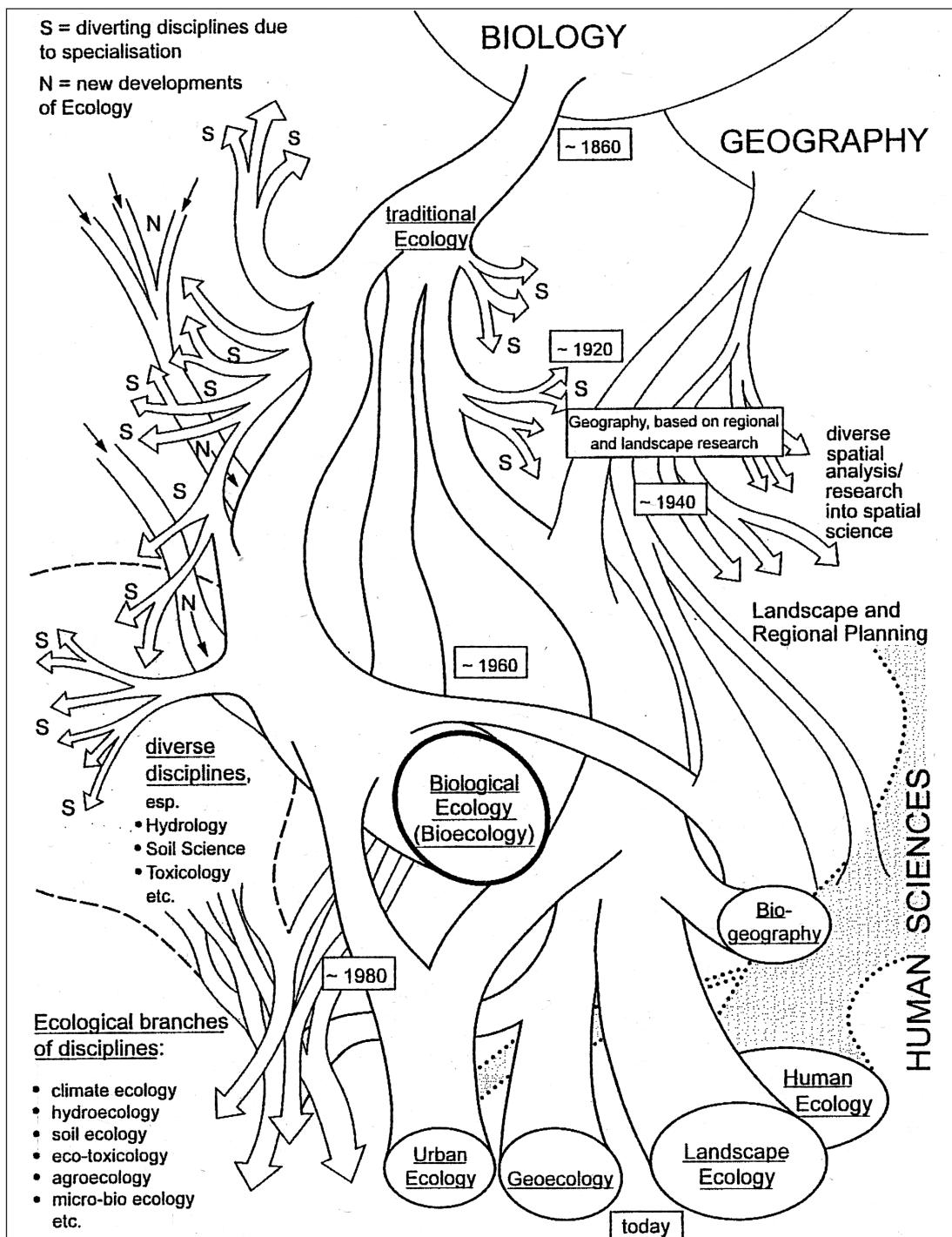


Abb. 2-3: Die Entwicklung der Landschaftsökologie aus den Disziplinen Biologie und Geographie in ihrer zeitlichen Entwicklung und die Aufspaltung in ihre Spezialdisziplinen (LESER 2007).

Die Landschaftsökologie soll nach Leser (2007) heute vielmehr als eine Plattform angesehen werden, die von verschiedenen Disziplinen zur Beantwortung gemeinsamer

Fragestellungen benutzt werden kann (BRUNOTTE ET AL. 2002, LESER 2007). Damit gewinnen die Theorien zu Multi-, Inter- und Transdisziplinarität (LESER 2007, TRESS ET AL. 2005) und neuerdings der ‚Cross-disciplinarity‘ (TRESS ET AL. 2005) an Bedeutung. Das Erkenntnisziel der Landschaftsökologie bleibt jedoch das Verstehen des Landschaftshaushalts als Wirkgefüge aus der abiotischen Umwelt und den Lebewesen (BRUNOTTE ET AL. 2002).

Die Weiterentwicklung der Landschaftsökologie seit Carl Troll ist im US-amerikanischen Raum anders verlaufen als in Europa. Vor allem in den USA ist der Begriff ‚landscape ecology‘ geprägt durch biophysikalische und analytische Überlegungen (WU & HOBBS 2007a), die stärker durch die Fächer Biologie und Ökologie beeinflusst sind als in Europa. Eine theoretische Aufarbeitung des Begriffes ‚landscape ecology‘ erfolgte hier erst seit den 1980er Jahren (WU & HOBBS 2007b). Aber auch hier werden die Begriffe *Landschaft*, *ökologische Prozesse* und *räumliche Strukturen* in den Definitionen zentral verwendet (Vorsicht ist jedoch vor dem unterschiedlichen Gebrauch der Fachbegriffe in den jeweiligen Sprachen geboten).

Die Entwicklung im europäischen Raum lässt sich in einzelne Phasen gliedern: Das erste Konzept der Landschaftsökologie wird in LÖFFLER & STEINHARDT (2007) mit der Veröffentlichung von NEEF (1967) gleichgesetzt, der erstmals eine „echte Theorie zur Landschaftsökologie entwickelt hat“ (LÖFFLER & STEINHARDT 2007). Dieser Phase stellt MOSIMANN (2007) eine von TROLL (1939) ausgehende Phase vor, die sich mit einer Naturlandschaftsgliederung beschäftigt und den Anfang der Quantifizierung von Rauminhalten und Grenzen darstellt. Eine dritte, vierte und fünfte Phase beschreibt MOSIMANN (2007) mit Schlüsselbegriffen oder neuen Konzepten: Die landschaftsökologische Systemanalyse, die den Übergang von Einzelmessungen hin zu einem Systemverständnis darstellt, dominierte die Landschaftsökologie ab Mitte der 1970er bis etwa zur Mitte der 1990er Jahre. Mit der technischen Innovation der Geographischen Informationssysteme (GIS) wurde die Landschaftshaushaltsanalyse mit Simulationsmodellen für Prozesse des Klima-, Wasser- und Stoffhaushalts Wirklichkeit. Die Einführung der GIS hat das Vorgehen aber auch theoretisch und methodisch verändert. So sind vor allem Weiterentwicklungen auf der Skalentransferebene auf die Nutzung der GIS zurückzuführen. Die fünfte Phase aktuellster Entwicklungen wird mit neuen

methodischen Fortschritten, insbesondere bei quantitativen Gefügemusteranalysen und der Ableitung modellgestützter Landschaftsleitbilder, verbunden.

LESER (2007) bringt, wie auch andere Autoren (z.B. WU & HOBBS 2007a, FRY ET AL. 2007), die Landschaftsökologie ausdrücklich mit der interdisziplinären und transdisziplinären Forschung in Verbindung, indem eine Gruppe von Wissenschaftlern geoökologische Methoden nutzt, um Mensch/Umwelt-Systeme zu analysieren (vgl. Kap 2.2.2). LESER (2007) benutzt mehrfach den Begriff transdisziplinär und weist darauf hin, dass in der Wissenschaft der Begriff interdisziplinär eine weiter verbreitete Verwendung findet, obwohl in der Regel eher eine Transdisziplinarität vorliegt. (Eine Unterscheidung soll in diesem Rahmen nicht stattfinden, da für die Fragestellung der vorliegenden Arbeit eine Unterscheidung der Disziplinarität nicht notwendig ist. Es sei hier jedoch auf die ausführlichen Definitionen von FRY ET AL. (2007) oder LESER (2007) verwiesen.)

Der erste Schritt der landschaftsökologischen Forschung ist die Erfassung der rezenten Landschaft mit ihren typischen Elementen und deren Entwicklung (TURNER & GARDNER 1991, HAASE 1996 sowie DIKAU & SCHMIDT 1999, die die Georeliefklassifikation in einem Grundlagenwerk zur angewandten Landschaftsökologie vorstellen). Damit fällt der Geomorphologie nach RENSCHLER et al. (2007) eine Schlüsselrolle in der Analyse landschaftsökologischer Fragestellungen zu, gerade mit der Weiterentwicklung und der Integration von Fernerkundung und GIS im späten 20sten Jahrhundert. Für die holozäne Landschaftsanalyse sieht BRÜCKNER (2006) dies als ein aktuelles und zukünftiges Forschungsfeld in dem eine flächendeckende hoch aufgelöste Geomorphologie, bspw. durch digitale großmaßstäbige geomorphologische Karten, abgeleitet werden soll. Dabei spielt der Erfassungs- und Ausgabemaßstab eine wichtige Rolle. In der Landschaftsökologie unterscheidet man prinzipiell zwischen vier Maßstabsebenen: der topologischen, chorologischen, regionalen und geosphärischen Dimension (BASTIAN & STEINHARDT 2002), von 1:100 bis zur kontinentalen Betrachtung. Die chorologische Maßstabsebene (etwa 1:25.000-1:100.000) ermöglicht es, Landschaftseinheiten in einer Weise zu unterscheiden und zu charakterisieren, in der bspw. räumliche Kombinationen einzelner Geoökofaktoren durchgeführt werden können (LESER & MOSIMANN 1997, BASTIAN & STEINHARDT 2002, LESER 2007). Für die meisten

Fragestellungen der Landschaftsökologie stellt die chorologische zusammen mit der topologischen Dimension die geeignete Maßstabsebene dar (LESER 2007). Das Nutzen dieser Maßstabsebenen setzt voraus, dass die genutzten Rohdaten *kompatibel* sind, also aufgrund ihres Erhebungsmaßstabs in die maßstäbliche Betrachtung passen. Dies bedeutet bspw. für die Ableitung archäologischer Ausprägungen einer ganzen Fundregion mit vielen einzelnen Fundplätzen, dass eine Generalisierung stattfinden muss, da der Erhebungsmaßstab in die topologische Dimension fällt (s.a. zu dieser Problematik Kap. 4.1.5, 5 und 6).

Eine Sonderstellung in der Landschaftsökologie besetzt die Anthroposphäre, da der Mensch nicht nur in einem dreidimensionalen Raum aus Land, Wasser und Luft lebt, sondern sich ebenfalls in einer verändernden konzeptuellen Sphäre aus Gedanken und Bewusstsein entwickelt (NAVEH 1995). Dies ist prinzipiell auch bei der Rekonstruktion eines vergangenen Nutzungspotentials von Bedeutung. Im Wesentlichen beschränkt sich die vorliegende Arbeit aber auf die physischen Faktoren.

HOBBS & WU (2007) stellen eine ausführliche Liste von Disziplinen und Arbeitsfeldern vor, die Landschaftsökologie betreiben. Darin enthalten ist die ‚Land-use and land-cover change‘-Forschung mit den ‚Long-term landscape changes driven by economies and climate change‘ („Langfristiger Landschaftswandel aufgrund von ökonomischen Einflüssen und Klimawandel“).

Im Folgenden wird das Konzept der Nutzungspotential-Analyse im Rahmen des Teilprojektes E1 des SFB 389 näher erläutert.

2.2.2 Konzept des Begriffes „Nutzungspotential“ im Teilprojekt E1 des SFB 389

Generell kann der Begriff *Nutzungspotential* in der Geographie als das Vermögen einer Landschaft definiert werden einen bestimmten Nutzen zu ermöglichen. Dabei wird der Begriff *Potential* in Machbarkeitsstudien meist mit der Produktivität eines Faktors oder eines Systems in Verbindung mit der Quantität oder Qualität in einem festgelegten Zeitraum genutzt (z.B. KUTTER ET AL. 1997). Häufig werden die Begriffe Nutzungspotential, oder im Englischen ‚land use potential‘ oder ‚land potential‘, in einen rezenten Zeithorizont gestellt, wie bspw. von DURAM ET AL. (2004) mit der Rekonstruktion des Landschaftswandels und der Topographie des südlichen Illinois

(USA) seit der Besiedlung von 1807 bis 1993 oder mit der Festlegung eines ‚land-use potential‘ (BAJA ET AL. 2002) für den Ackerbau an Hängen in New South Wales (Australien) oder mit der Bestimmung eines ‚land potential‘ verschiedener Inseln des Fidschi-Archipels (LATHAM & DENIS 1980).

Letztere stellen ein Fließdiagramm zur Definition eines ‚land potential‘ vor, das in Abbildung 2-4 wiedergegeben ist. Das Diagramm, das sich in den Kernmodulen auch auf die Nutzungspotentialforschung des Holozäns anwenden lässt, ist in weiten Teilen vergleichbar mit dem in Abbildung 2-5 abgebildeten Modell zur Bestimmung eines holozänen Nutzungspotentials. Der linke Bereich des Diagramms von LATHAM & DENIS (1980) enthält Teile einer landschaftsökologischen Beschreibung der Untersuchungsregion (Abb. 2-4A), dem die sozioökonomische Ausstattung entgegen gesetzt ist (Abb. 2-4B). Die Definition landschaftsökologischer Einheiten kann verglichen werden mit der Ableitung geomorphometrischer Parameter (Abb. 2-5a), und die sozioökonomischen Angaben entsprechen den Informationen, die andere Quellen über eine Untersuchungsregion liefern können (Abb. 2-5b). Aus der Kombination der beiden Einflussbereiche werden die ‚Agrological qualities of ecological units‘ abgeleitet (Abb. 2-4) und in das Nutzungspotential, vergleichbar mit der statistischen Auswertung der Beziehungsgefüge in Abbildung 2-5, einbezogen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit bewegt sich der Begriff Nutzungspotential im Überschneidungsbereich zwischen Geomorphologie, Landschaftsökologie und Archäologie. In den letzten Jahren wird der Begriff Nutzungspotential auch in Verbindung mit der Geoarchäologie eingesetzt, indem hier „Nutzungspotentiale der Vergangenheit“ (WIKIPEDIA 2007a) als Ansatzpunkte zur Rekonstruktion vergangener Landschaften abgeleitet werden. Die Geoarchäologie, verstanden als Disziplin, die zur Aufgabe hat, archäologische Fragen mit geowissenschaftlichen Konzepten, Methoden und Kenntnissen zu beantworten (BRÜCKNER & GERLACH 2007), sieht als eine Kernaufgabe die Umweltrekonstruktion der Geofaktoren einer archäologischen Stätte (BRÜCKNER 2006), sodass die Nutzungspotential-Analyse in Verbindung mit der Archäologie auch als ein Werkzeug der Geoarchäologie bezeichnet werden kann, bzw. eine Nutzungspotential-Analyse mit geoarchäologischen Informationen eines Raumes durchgeführt werden kann. Diese Forschungsaufgaben verbindet das Fach stark

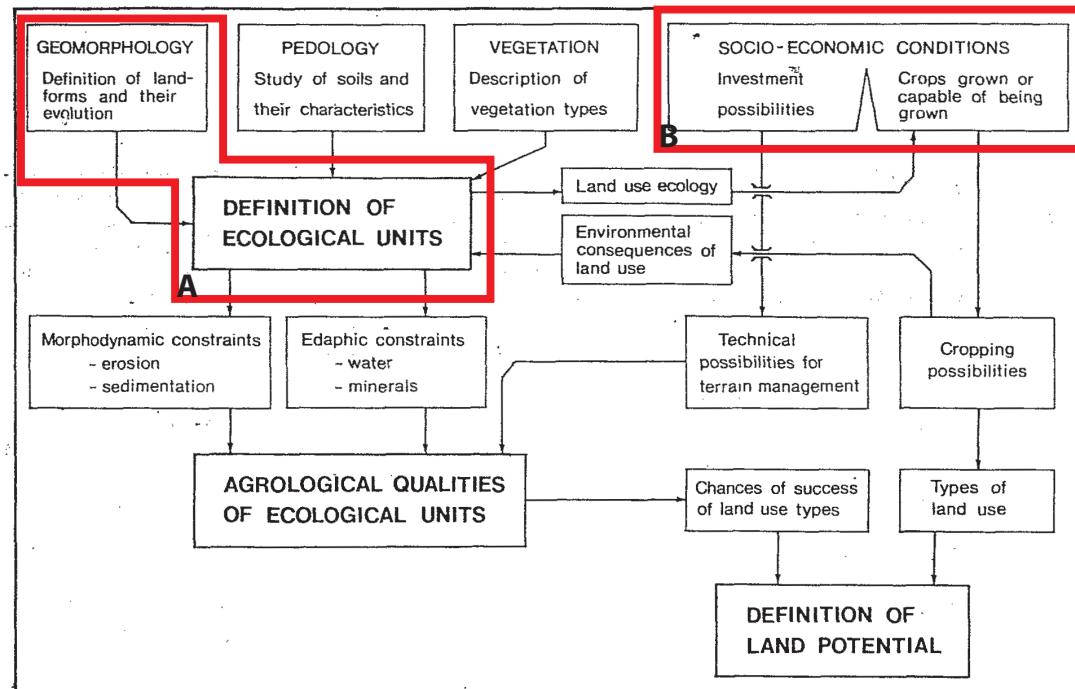


Abb. 2-4: Fließdiagramm aus LATHAM & DENIS (1980) (ergänzt). Ableitung eines „land potential“ ausgehend von Geofaktoren (A) und sozioökonomischen Faktoren (B). Die Bereiche Böden und Vegetation spielen aktuell im Untersuchungsgebiet (s. Kap. 3) eine untergeordnete Rolle, können jedoch in das Modell (Abb. 2-5) eingebaut werden. Weitere Informationen im Text.

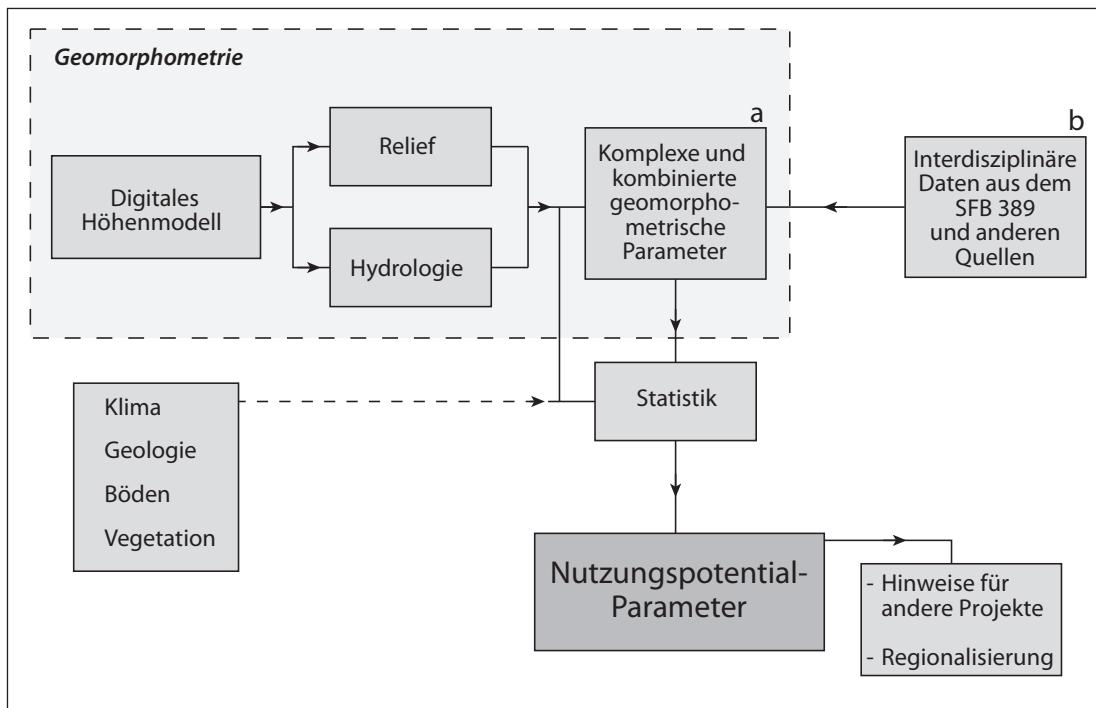


Abb. 2-5: Weiterentwickeltes Fließdiagramm aus BOLTEN ET AL. (in press) zur Ableitung von Nutzungspotential-Parametern im Teilprojekt E1 des SFB 389. Weitere Informationen im Text.

mit den modernen Themenfeldern der Geomorphologie durch das Anstreben einer holozänen Umweltrekonstruktion für verschiedene Zeitscheiben (BRÜCKNER 2006).

Im Rahmen des Teilprojektes E1 des SFB 389 steht der Begriff Nutzungspotential allgemein im Schnittfeld zwischen den Geowissenschaften (insbesondere der Geomor-

phologie, aber auch der (Archäo)-Botanik), die eine Rekonstruktion der vorzeitlichen Landschaft ermöglichen, und den Kulturwissenschaften, die eine Rekonstruktion des im Holozän lebenden und die Landschaft nutzenden Menschen zum Ziel haben. Ebenso wie sich – durch ein sich änderndes Klima – ein Landschaftswandel im Holozän im Untersuchungsraum vollzogen hat (vgl. Kap. 3), ändert sich auch das Potential der Landschaft für den Menschen und damit die Möglichkeiten des Überlebens und des Nutzens der Landschaft unter sich wandelnden Grenzbedingungen. Die Nutzungspotential-Analyse ermöglicht es, Hinweise darüber zu finden, welche naturräumlichen Merkmale zu welcher Zeit für die Lebensweise und die Nutzung der Landschaft des holozänen Menschen von Bedeutung waren. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass das Beziehungsgefüge aus Naturraum und Mensch kein einseitiges Verhältnis ist, indem der Mensch auf die sich ändernde Natur in einem klimatischen Extremraum lediglich durch Ausweichen reagieren kann (KINDERMANN ET AL. 2006). Für die betrachteten Zeiträume im Holozän zeigen MESSERLI ET AL. (2000) jedoch, dass von einer „nature-dominated“ (MESSERLI ET AL. 2000) Umwelt auszugehen ist, in der die Anpassungsstrategien des Menschen auf Umweltveränderungen wenig ausgeprägt waren. Auch EITEL & MÄCHTLE (2006) und EITEL ET AL. (2005) gehen von einer wesentlichen Beeinflussung von Agrargesellschaften durch Umwelteinflüsse aus. Hierbei beziehen sie sich speziell auf die Verschiebung des Wüstenrandes im Zeitraum von 800 BC bis 1500 AD im heutigen Peru und deren Auswirkung auf die Nutzung der Landschaft. Diese Fallstudie betrachtet somit eine spätere Zeitscheibe als die Zeiträume, die in der vorliegenden Arbeit untersucht werden.

Dass in Abbildung 2-5 verändert und weiterentwickelt wiedergegebene Fließdiagramm zeigt einen möglichen Weg zur Ableitung von Parametern für das holozäne Nutzungspotential einer Landschaft auf. Zwei Quellen (vgl. a. Kap. 4.1) stehen dabei in der praktischen Durchführung im Mittelpunkt:

- Zum einen die Einbeziehung vorhandener Daten anderer Teilprojekte des SFB 389 oder Fremddaten (frei oder kommerziell verfügbar) über ein zu untersuchendes Gebiet,
- zum anderen Daten aus digitalen Höheninformationen der gleichen Region, die mit geomorphometrischen Analysen verarbeitet werden.

Mittels einer statistischen Analyse können daraus Parameter für eine Nutzungsabschätzung abgeleitet werden, die mit Regionalisierungstechniken (z.B. KLEEBERG 1999) die punkthaften Informationen einzelner ausgewählter Untersuchungsregionen in flächenhafte Informationen interpolieren.

Einen verallgemeinerten Aufbau der Herleitung von holozänen Nutzungsabschätzungsparametern zeigt Abbildung 2-6.

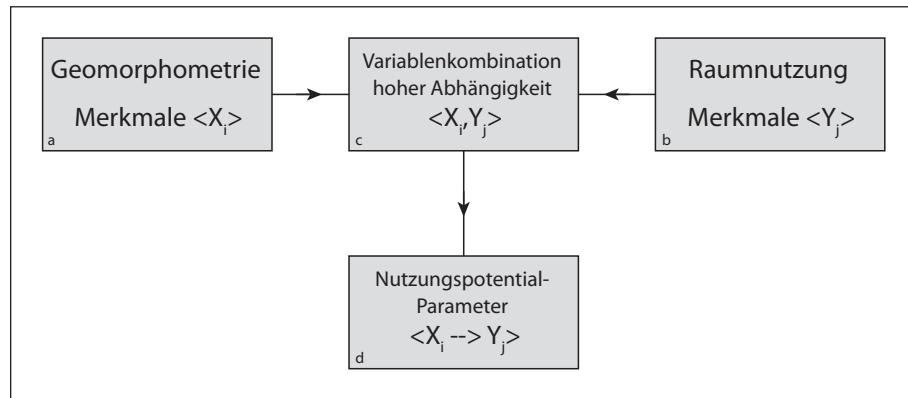


Abb. 2-6: Fließdiagramm zur Ableitung von holozänen Nutzungsabschätzungsparametern aus der Geomorphometrie (a) und den Nutzungsmerkmalen des Raumes durch den Menschen (b). Aus den einzelnen Merkmalen X und Y können über Beziehungsabhängigkeiten (c) diejenigen Merkmale aus der Geomorphometrie bestimmt werden, die eine hohe Korrelation mit Raumnutzungsmerkmalen aufweisen (d).

In der holozänen Nutzungsabschätzungsanalyse wird der landschaftsökologische Begriff der „Nutzungseignung“ (MOSIMANN 2007) in den vorzeitlichen Horizont gestellt, indem aus der Rekonstruktion der vorzeitlichen Landschaft in Verbindung mit Informationen über den die Landschaft nutzenden Menschen auf das Potential der Landschaft für den damals lebenden Menschen geschlossen wird. Dabei kann das Potential aus verschiedenen Möglichkeiten für den Menschen bestehen, die vor allem mit dem Überleben in Verbindung stehen. Auch in den semiariden Zeiten des Holozäns der Western Desert Ägyptens (vgl. Kap. 3) hatte die Wasser- und die damit verbundene Vegetationsverfügbarkeit für den damals lebenden Menschen wahrscheinlich die höchste Priorität.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Nutzungsabschätzungsanalyse als eine Teildisziplin der Landschaftsökologie verstanden werden kann oder, nach

LESER (2007), auf der Plattform der Landschaftsökologie stattfindet und ein interdisziplinäres Umfeld voraussetzt. Die holozäne Nutzungspotential-Analyse projiziert dabei die Fragestellungen der rezenten Analyse zum Potential einer Landschaft in die Vergangenheit, sie muss jedoch von unterschiedlichen Randbedingungen ausgehen, gerade in Bezug auf die aktuelle Mensch/Umwelt Interaktion, der in den ariden und semiariden Räumen des Holozäns eher einer Mensch/Umwelt-Reaktion gegenüber steht.

3. Naturräumliche Gegebenheiten des Untersuchungsgebietes

Im Folgenden wird das Untersuchungsgebiet mit den relevanten Elementen der klassischen naturräumlichen Gliederung vorgestellt. Dabei wird auch auf die klimatische Entwicklung des Raumes eingegangen, so wie sie sich seit dem späten Pleistozän darstellt. Die Bereiche Boden und Vegetation werden dabei ausgeklammert, da sie für die hier präsentierte Untersuchung nur eine untergeordnete Rolle spielen. Es sei aber ausdrücklich auf Arbeiten zum *Boden* von Smettan (1987) und Alaily (2007) und zur *Vegetation* von Bornkamm & Kehl (1990), Bornkamm & Darius (1999) und Bornkamm et al. (2000) verwiesen.

Als Quellen in diesem Kapitel dienen vor allem die Ergebnisse des SFB 69 *Geowissenschaftliche Probleme in ariden und semiariden Gebieten* (KLITZSCH & THORWEIHE 1999) in dem detailliert die Region geologisch und klimahistorisch untersucht wurde sowie die Ergebnisse des SFB 389 ACACIA und des Vorläuferprojektes B.O.S. *Besiedlungsgeschichte der Ostsahara*.

3.1 Lage und Topographie

Die *Western Desert*, oder oft auch *Westwüste* in der deutschsprachigen Literatur, ist die größte Landschaftseinheit Ägyptens (EMBABI 2004) mit ca. 681.000 km² (SAID 1990). Sie umfasst Plateaus, Depressionen, Dünen und Ebenen, sowie einige Oasen, die ihr Wasser aus dem nubischen Aquifer beziehen. Die Höhe der Western Desert liegt im Durchschnitt bei etwa 290 m (Mittelwert aus SRTM-3 Daten). Nur der Bereich des Gilf Kebirs und des Djebel Ouenats reichen über 1000 m. Die niedrigsten Gebiete liegen in den nördlichen Depressionen unter dem Meeresspiegel.

Die Bezeichnung *Western Desert* wird von vielen Autoren genutzt, jedoch wird die Landschaftseinheit meist unterschiedlich abgegrenzt. EMBABI (2004) grenzt die Region im Süden durch die Selima Sandsheet, einer flachen Sandebene, ab, die im Norden in die Dakhla-/Kharga-Depression übergeht. Der Osten wird durch das eozäne Kalksteinplateau des Niltals begrenzt. Das Gilf Kebir Plateau und das Gebiet um den Djebel Ouenat begrenzen die Western Desert im SW. Die Westgrenze bildet die Große Sandsee, die sich auf libyschem Staatsgebiet fortsetzt. Nach Norden, nördlich der Schichtstufenlandschaft des Oasenbogens, bilden mehrere große Depressionen

beginnend im Westen bei Siwa über die Qattara-Depression bis zur Fayum-Depression die Grenze der Western Desert (EMBABI 2004). In Abbildung 3-1 wird die Western Desert nach den Angaben aus Embabi (2004) auf einer aus BOLTEN et al. (2006) entnommenen topographisch-geomorphologischen Karte verortet. Darüber hinaus ist die Hauptuntersuchungsregion des Teilprojektes A1 des SFB 389 dargestellt, wie sie aus den Berichtsbänden zu rekonstruieren ist (ebenfalls arbeitet das Teilprojekt E3 in diesem Gebiet, jedoch hauptsächlich linienhaft entlang einer historischen Route in diesem Gebiet) (s. hierzu auch die SFB 389-Homepage www.uni-koeln.de/sfb389).

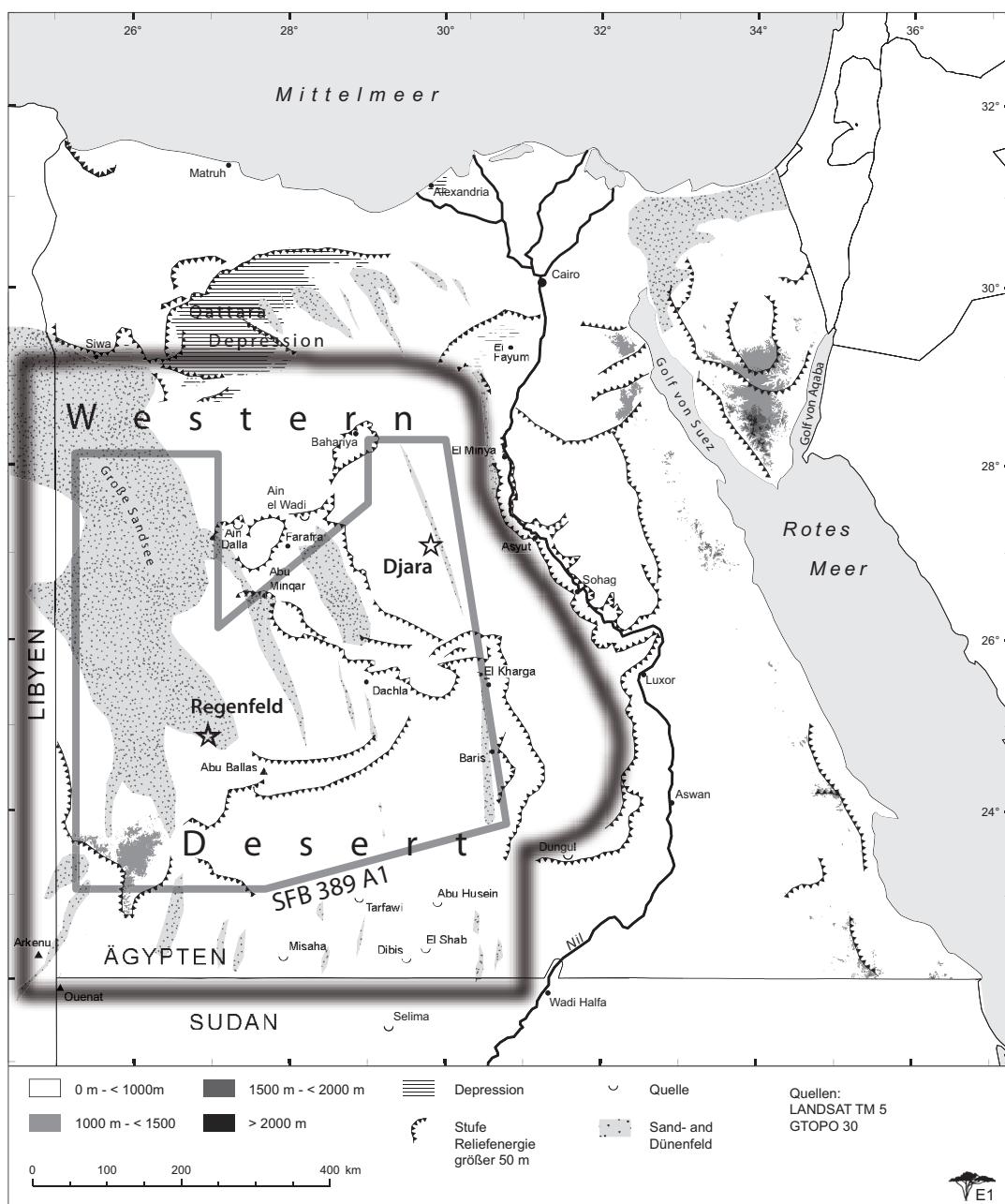


Abb. 3-1: Die Lage der Western Desert und der Untersuchungsregion des Teilprojektes A1 des SFB 389 sowie der beiden Fundregionen Djara und Regenfeld (vgl. Kap. 6.1 und Anhang I). Erläuterungen zur Abgrenzung im Text. (eigener Entwurf, Grundlage z.B. in BOLTEN ET AL. 2006)

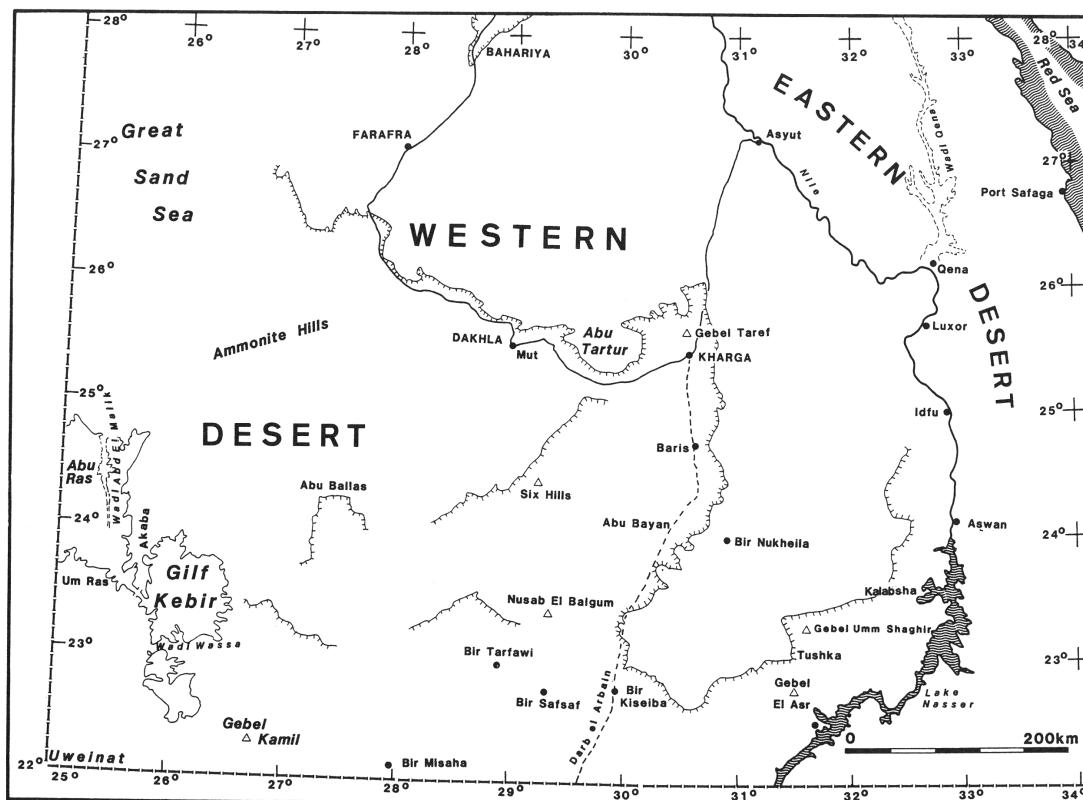


Abb. 3-2: Die südliche Western Desert dargestellt in KLITZSCH & SCHANDELMEIER (1990).

Einige Autoren teilen die Western Desert darüber hinaus in einen südlichen und nördlichen Teil auf. Die Grenze der beiden Teile liegt dabei bei etwa 28°N (KLITZSCH & SCHANDELMEIER 1990) (Abb. 3-2) und entspricht damit auch der ungefähren Untersuchungsregion des Teilprojektes A1 des SFB 389 (vgl. Abb. 3-1).

Abbildung 3-3 gibt Höhenschichten – abgeleitet aus SRTM-3-Daten (vgl. Kap. 4.2.2.4) – der Region wieder. Gut zu erkennen ist der strukturelle Aufbau der Region, bestehend aus Depressionen, den randlichen Schichtstufen und Höhenzügen. Im Einzelnen sind in der Western Desert die Höhenzüge des Gilf Kebirs, die Schichtstufen entlang des Oasenbogens und die Depressionen, sowie die sandbedeckten Regionen der Sandseen und der Selima sand sheet (vgl. Abb. 3-3 und Anhang I) als formgebende Elemente vorhanden (EMBABI 2004).

Für die Analyse des holozänen Reliefs mit einem aktualistischen Ansatz muss davon ausgegangen werden, dass das Relief mindestens seit dem Jungpleistozän stabil ist, da ansonsten eine geomorphometrische Analyse des rezenten Reliefs keine Aussagen für das Gesamt-Holozän zulassen würde. Indizien für eine noch längere Stabilität finden sich dafür in vielfältiger Weise in der Literatur: Aus den pedologischen, sedimento-

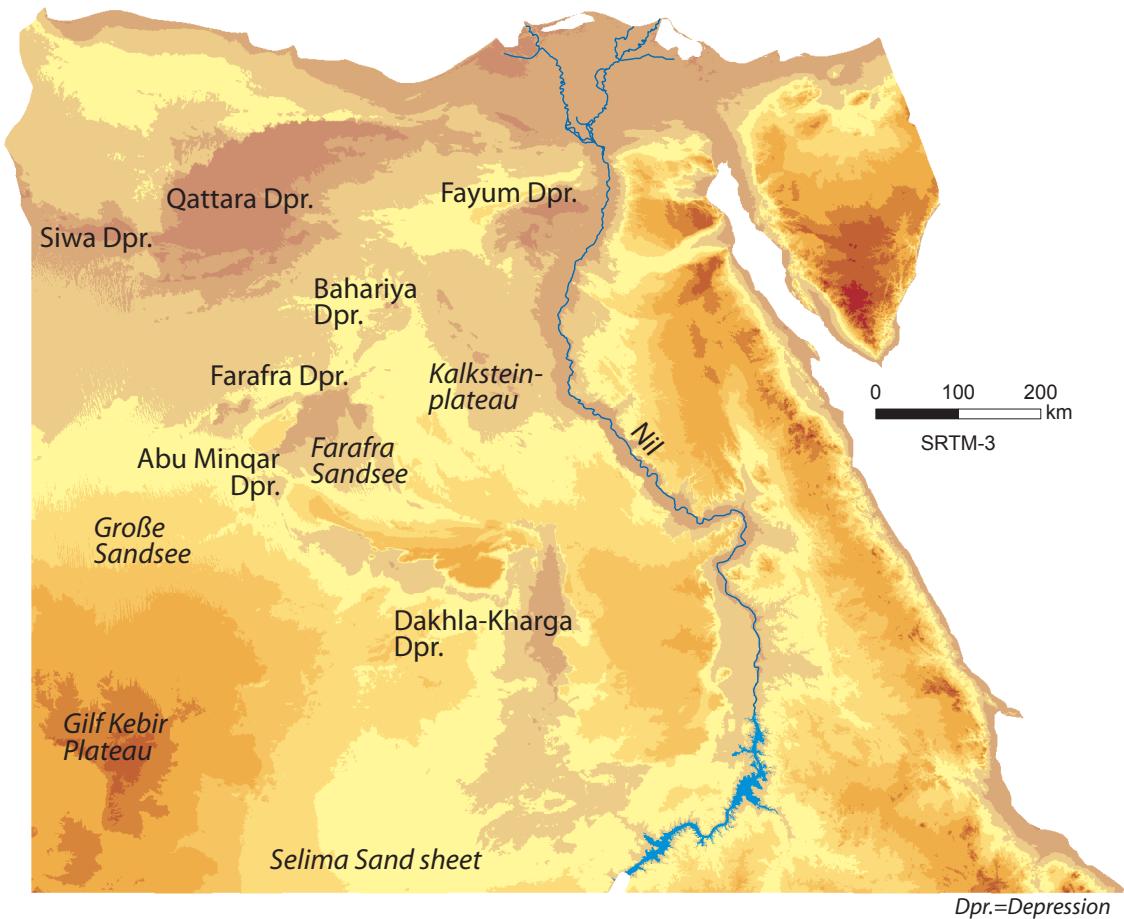


Abb. 3-3: Höhenschichtenkarte mit den topographischen Landschaftsmerkmalen nach EMBABI (2004) zur Eingrenzung der Western Desert. (eigener Entwurf aus SRTM-3 Daten)

logischen, archäobotanischen und -zoologischen Daten wird eine Niederschlagshöhe von ca. 50-100 mm für den Kernbereich der holozänen Feuchtphase angenommen (z.B. NEUMANN 1989, KINDERMANN ET AL. 2006, BUBENZER & RIEMER 2007, KUPER & KRÖPELIN 2006). Daraus kann abgeleitet werden, dass außerhalb der fluvialen Erosions- (Niltal, größere Wadis) und Akkumulationsgebiete keine grundsätzlichen Reliefveränderungen stattgefunden haben. Zeiger dafür sind auch ausgedehnte Hammadaflächen, z.T. mit mesolithischen oder paläolithischen Artefakten (vom Autor selbst im Frühjahr 2000 beobachtet), die als ungestört angesprochen werden können. Markante fluviale Erosionsformen beschränken sich nur auf die Unterläufe der Wadis (z.B. Abu Tartur in BUBENZER & RIEMER 2007 (vgl. Abb. 5-11) oder Gilf Kebir in LINSTÄDTER & KRÖPELIN 2004). Eine Formungsruhe liegt somit nicht vor, jedoch sind seit dem letzten Hochglazial nur geringe Reliefveränderungen zu erwarten, die die grundsätzliche Abflusssituation und topographische Position einzelner Standorte nicht verändert hat.

3.2 Geologie und Geomorphologie

Die Geologie der Region wird vor allem durch Material des Tertiärs und des Mesozoiiks aufgebaut. Daneben findet sich älteres Material z.B. im Gilf Kebir und jüngeres Material in den sandbedeckten Regionen.

Die Geologie Ägyptens wird ausführlich in EMBABI (2004), SAID (1990) und HERMINA ET AL. (1989) beschrieben und lässt sich zunächst grob in einen ‚Basement Complex‘ und einen ‚Sedimentary Cover‘ unterscheiden (SAID 1999, HERMINA ET AL. 1989 nach EMBABI 2004).

Für eine Veranschaulichung ist eine generalisierte Übersicht der Geologie Ägyptens angefertigt worden und in Abbildung 3-4 dargestellt. Die Daten sind der geologischen Karte von Afrika (USGS 1997) entnommen. Die Hauptformationseinteilung wurde aus der geologischen Karte 1:2.000.000 (EGYPTIAN GEOLOGICAL SURVEY 1981) und EMBABI (2004) abgeleitet. Einzelne Bereiche sind dabei zusammengefasst worden, aus

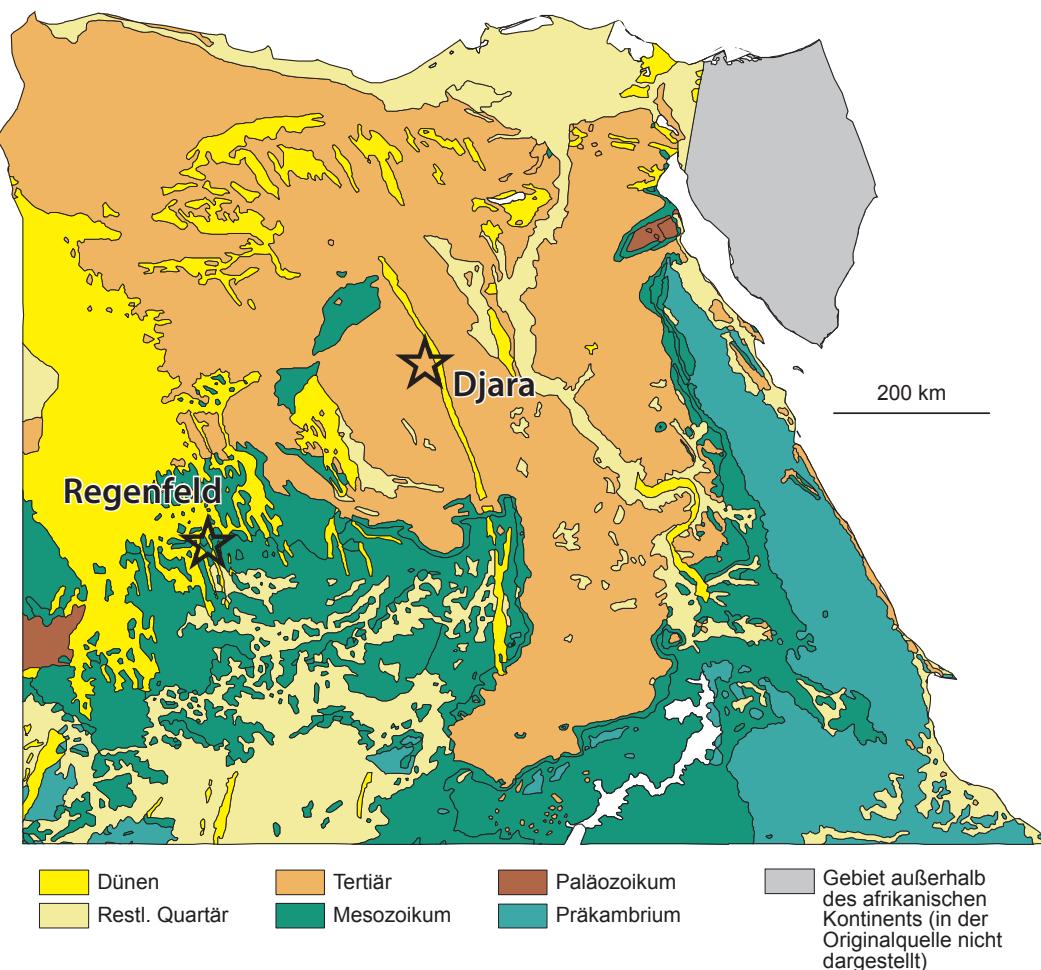


Abb. 3-4: Generalisierte geologische Karte Ägyptens nach USGS (1997). Lokalisiert sind die beiden Fallstudienregionen aus Kapitel 6.1. Weitere Informationen im Text. (eigener Entwurf nach USGS 1997, EGYPTIAN GEOLOGICAL SURVEY 1981, EMBABI 2004)

denen sich folgende Formationen ableiten, verorten und in die oben angesprochene Hauptunterscheidung aufspalten lassen.

,Basement Complex':

- Präkambrium: Das Präkambrium formt mit den anderen Vorkommen in Äthiopien und Somalia den Nubischen Schild. In Ägypten finden sich Vorkommen im Gebirge des Roten Meeres, im Ouenat und in wenigen kleineren Regionen der südlichen Western Desert. Die ältesten Datierungen aus dieser Formation lassen sich dabei im Ouenat mit 2,7 Mrd. Jahren angeben (Karkur Murr Serie, LIST ET AL. 1989).

,Sedimentary Cover' eingeteilt in Paläozoikum, Mesozoikum und Känozoikum:

- Paläozoikum: Das Paläozoikum ist nur in kleinen Bereichen im Westen der Western Desert im Übergang zur Kufra-Region Libyens vorhanden. Ein weiteres Vorkommen befindet sich im Wadi Araba im nördlichen Teil der Ostsüste.
- Mesozoikum: Weite Teile der zentralen Western Desert und der Bereiche des südlichen Niltals Ägyptens sind aus mesozoischen Sedimenten aufgebaut. Kleinere Vorkommen befinden sich in den nördlichen Depressionen des Oasengürtels (Abu Minqar, Farafra, Bahariya).
- Tertiär: Die höhergelegenen Gebiete oberhalb der Schichtstufen sind dem Tertiär zuzuordnen, ziehen sich bis zur heutigen Mittelmeerküste und werden überlagert von quartären Sedimenten.
- Quartär: Das Quartär wird vor allem durch Sande der Selima Sand sheet und den Nilablagerungen gebildet.
- Die Dünen bilden die jüngsten Sedimente, die im Pleistozän und Holozän akkumuliert wurden. Hier sind vor allem die Große Sandsee, die Farafra Sandsee, kleinere Gebiete um und in der Qattara Depression sowie der Abu Muharik Dünengürtel auf dem Kalksteinplateau zu nennen.

Nähere Informationen zur Geologie der beiden Fallstudienregionen liefert Kapitel 6. Abbildung 3-5 gibt zur Vollständigkeit einen detaillierten Überblick über die Geologie der südlichen Western Desert, welche der Geologischen Karte 1:2.000.000 entnommen

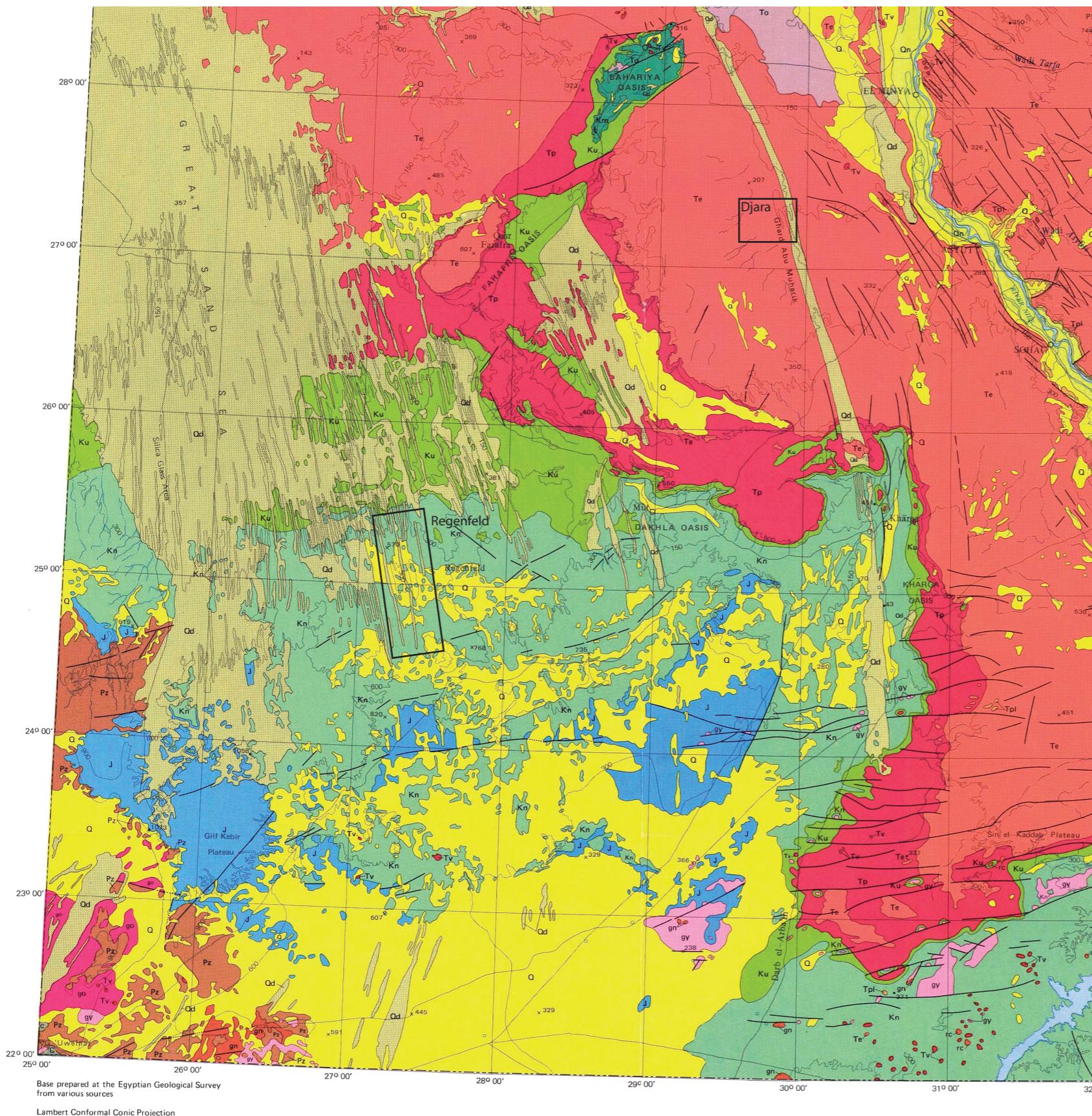


Abb. 3-5: Geologische Karte der Western Desert mit den Untersuchungsgebieten des Kapitels 6. Ausschnitt aus der geologischen Karte Ägyptens 1:2.000.000. (verändert nach EGYPTIAN GEOLOGICAL SURVEY 1981)

GEOLOGIC MAP OF EGYPT 1981



wurde (EGYPTIAN GEOLOGICAL SURVEY 1981). Explizit sei auf die hervorragenden geologischen Karten Ägyptens im Maßstab 1:500.000 hingewiesen, die im Rahmen des SFB 69 entstanden sind (KLITZSCH ET AL. 1987) (vgl. a. Kap. 6.1).

Geomorphologisch wird die Western Desert dominiert von Jungformen und überprägten Altformen, wobei das Großrelief größtenteils vererbt ist (BESLER 1992). Zu den jungen Formen gehören alle äolischen Formen und zum Teil fluviale Formen. Die Altformen umfassen die Schichstufenlandschaften, Plateaus und Depressionen.

Gebiete, in denen genügend Sand vorhanden ist, sind, je nach Sandmenge, Untergrund, uni- oder bimodalen Winden, von Sandakkumulationen bedeckt: Longitudinaldünen der Großen Sandsee im Westen, im Zentrum der Farafra Sandsee sowie der Abu Muharik-Dünenzug im Osten. Barchane sind dort zu finden, wo das Sandangebot geringer und die Windrichtung stetiger ist (BESLER 1992). Dies ist vor allem im Süden im Übergang zur Selima Sand Sheet der Fall.

Die Schichtstufen der Western Desert (vgl. Abb. 3-1) dominieren den Osten und das südliche Zentrum der Western Desert und sind gestaffelt entlang des Oasenbogens angeordnet. Aufgrund tektonischer Bewegung im Tertiär sind die Schichten wechselnder Widerständigkeit leicht verstellt und bilden entlang der Formationsgrenzen lange Schichtstufenkanten aus. Eine starke Formung erfuhren diese im Pleistozän (BESLER 1992). Die Dachflächen der Schichtstufen wie auch die meisten anderen nicht mit Sand bedeckten Flächen der Western Desert sind mit Hammada bedeckt, die auf dem Kalksteinplateau Verkarstungsspuren aufweisen (EMBABI 2004, BESLER 1992).

Fluviale Prozesse und Zeugnisse sind im Satellitenbild und Gelände vielfach zu beobachten. Sie stammen zumeist aus dem Tertiär und Pleistozän (Besler 1992). Kleinformen sind jedoch mit heutigen seltenen Niederschlagsereignissen zu erklären (vgl. Abb. 5-11).

Die Depressionen lassen sich nach EMBABI (2004) in ihrer Entstehung in drei Gruppen einteilen: tektonisch, morphoklimatisch und polygenetisch.

- Tektonische Depressionen finden sich in der Western Desert entlang einer W-E verlaufenden Verwerfung bei ca. 24°30' N. In dieser Region südlich der Abu

Ballas Schichtstufe (vgl. Abb. 3-1) befinden sich die Abu Ballas Depression und weitere kleinere Depressionen (EMBABI 2004).

- Morphoklimatische Depressionen entstehen im Zusammenspiel aus Verwitterung, Winderosion und Verkarstung (EMBABI 2004). Dies bildet in der Western Desert kleinere Depressionen bis zu einem Kilometer Durchmesser, die sich vor allem auf dem Kalksteinplateau befinden. Hier wird der Prozess der Verkarstung als der am stärksten formende angenommen (EMBABI 2004).
- Polygenetische Depressionen entstehen durch exogene Einflüsse unter der Kontrolle geologischer Strukturen (EMBABI 2004). Dabei können zwei Hauptfaktoren der Verbindung festgehalten werden. Zum einen liegen die Hauptdepressionen direkt an den Grenzen geologischer Formationen, zum anderen finden sich in allen großen Depressionen tektonische Störungen (EMBABI 2004).

Die Hauptbildungszeit der Depressionen ist im Tertiär anzusiedeln, da für das Oligozän, Miozän und Pliozän von Feuchtzeiten ausgegangen wird, in der durch fluviale Erosion die Depressionen geformt wurden. In den Feuchtzeiten des Pleistozäns sind diese dann weitergebildet worden (EMBABI 2004).

3.3 Klima und Klimaentwicklung im Spätpleistozän und Holozän

Die Western Desert Ägyptens gehört heute zu einem BWh-Klima nach Köppen mit einer Jahresschnittstemperatur von etwa 23°C und einem Jahresniederschlag von unter 5 mm. Es herrscht ein typisches Tageszeitenklima vor. Der Temperaturverlauf folgt dem Strahlungsgang der Sonneneinstrahlung über den Tag hinweg. Die Daten des in Abbildung 3-6 dargestellten Thermoisoplethendiagramms entstammen der durch den SFB 389 aufgebauten Klimastation am Grabungshaus in Dakhla. Die Daten der ersten 1,5 Jahre sind in einer Diplomarbeit am Geographischen Institut durch RITTER (2005) ausgewertet worden.

Die Niederschlagshöhe ist für die Western Desert aufgrund der geringen Mengen wenig aussagekräftig. Die Anzahl der Regentage spielt hier eine größere Rolle, da sie Informationen über die Niederschlagsverteilung gibt und so die Wahrscheinlichkeit für Niederschlag eher anzeigt. Neuere Modelldaten nach NEW ET AL. (1999) geben

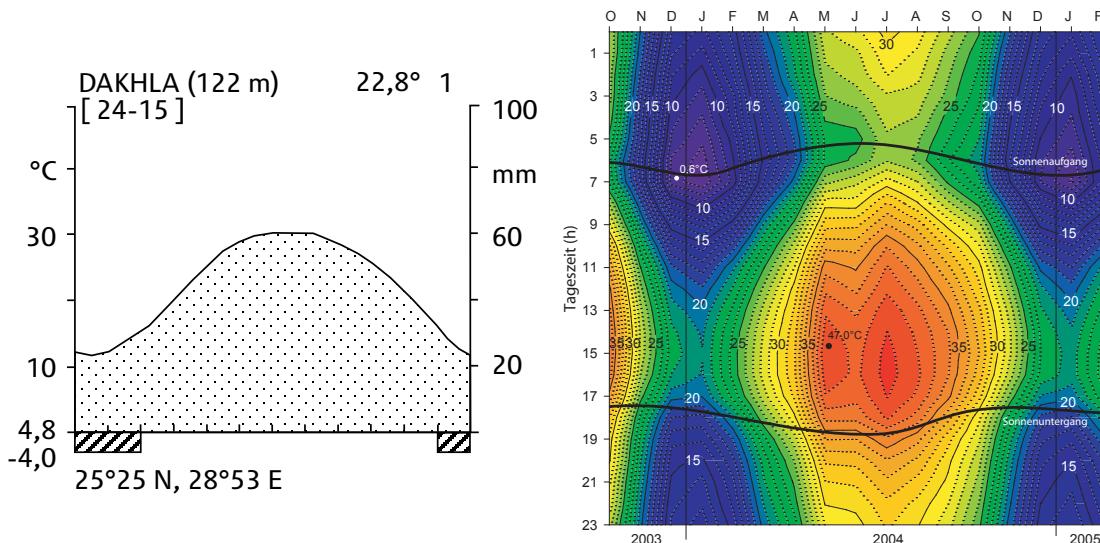


Abb. 3-6: Klimadiagramm für die Oase Dakhla nach WALTER & LIETH (1960) und ein Thermoisoplethendiagramm aus den Daten der Klimastation des SFB 389 am Grabungshaus in Dakhla (erstellt aus den bis Anfang 2005 gewonnen Daten von 1,5 Jahren). (verändert nach RITTER 2005)

dazu für die Region, die in Abbildung 3-7 dargestellten Werte an. Aufgrund der wenigen vorhandenen Stationsdaten der Region sind die Interpolationsräume jedoch sehr groß, und somit gibt die Karte nur ein grobes und ungenaues Bild wieder, das so nicht der Wirklichkeit entspricht, aber zurzeit den bestmöglichen Datensatz darstellt. Daten der neuen Meteosat-Satelliten stehen für die vorliegende Untersuchung nicht zur Verfügung. Für die Zukunft sind hier jedoch weitaus genauere Daten zu erwarten (EUMETSAT 2007). Das Kerngebiet der Western Desert hat somit durchschnittlich nur einen Regentag in zwei Jahren. Mehr Regentage finden sich nördlich durch einströmende feuchte Westwinde im Winter und nach Süden durch Monsuneinflüsse im Sommer. Weiteren Einfluss haben, durch erzwungene Hebung der Luftmassen, die höheren Regionen im Südwesten (Gilf Kebir und Ouenat). Die Frage der Herkunft verstärkter Niederschläge während der holozänen Feuchtphase ist ein zentraler Forschungsgegenstand im SFB 389 und konnte für einige Regionen, entgegen früherer Forschungsthesen, mit der Beeinflussung auch durch verstärkten Westwindeinfluss im Winter präzisiert werden (KINDERMANN ET AL. 2006, s.a. Kap. 6.1)

Aufgrund des geringen Jahresniederschlags ist die räumliche und zeitliche Variabilität extrem hoch. So sind starke Niederschläge in kurzer Zeit (einige Minuten bis Stunden) von mehreren Millimeter in eng begrenzten Räumen möglich (diese Regenfälle sind leider selten belegt und werden meist nur durch indirekte Funde – z.B.

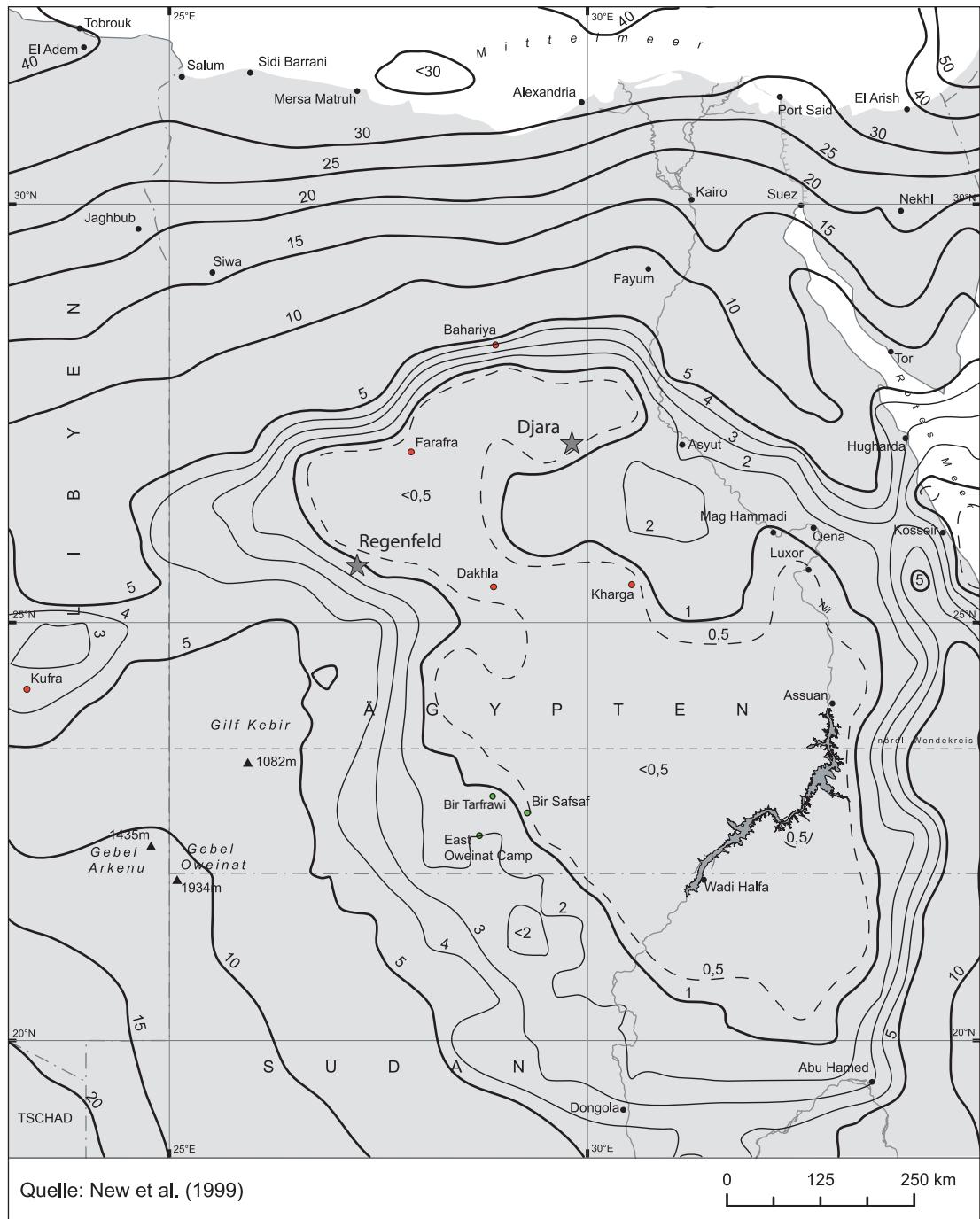


Abb. 3-7: Isolinien gleicher Anzahl an Niederschlagstagen im Jahresmittel berechnet aus Punktdaten von NEW ET AL. (1999). Mit Sternen sind die beiden Untersuchungsgebiete aus Kapitel 6 markiert. (verändert nach RITTER 2005)

Wadiabgänge – bemerkt). Vom Autor selbst konnte jedoch am 20.03.2000 ein kurzer Niederschlag – räumlich sicher auf wenige Quadratkilometer beschränkt – in der östlichen Großen Sandsee (ca. 75 km südwestlich Farafras) beobachtet werden, der jedoch sehr gering ausfiel (weniger als 0,1 mm) und keine morphologische Auswirkung hatte.

Die Klimaentwicklung des Raumes im Spätpleistozän und Holozän ist Gegenstand von Arbeiten einiger Forschergruppen der letzten Jahrzehnte gewesen. Eine umfassende Betrachtung würde den Rahmen der Arbeit sicher sprengen und kann hier nicht erfolgen.

Im Folgenden wird die Situation der Forschung in drei zeitlichen Ebenen wiedergegeben. Zunächst wird auf den Stand zu Beginn der 1980er Jahre eingegangen, die von GIESSNER (1981) zusammengefasst wurde. In einer Abschlussarbeit, betreut von Frau Prof. Besler am Geographischen Institut der Universität zu Köln, ist im Jahre 2001 angelehnt an GIESSNER (1981), durch JAKSCH (2001) die bis zum Jahre 2000 angefertigte Literatur zur Klimaentwicklung vervollständigt und graphisch aufbereitet worden. Die neuesten Informationen fassen KUPER & KRÖPELIN (2006) zusammen und geben die Forschungsergebnisse des SFB 389 und den Vorgängerprojekten zur Klima- und Besiedlungsgeschichte wieder; die Basis hierfür liefern über 500 ^{14}C -Daten. Dabei wird deutlich, dass eine Übertragung von Klimasignalen, abgeleitet aus Eisbohrkernen der Polarkappen oder Tiefseebohrungen, nur bedingt auf die Festlandgebiete der Tropen und Subtropen übertragbar ist (KUPER & KRÖPELIN 2006). Somit liefern Hinweise einer menschlichen Besiedlung und Nutzung eines Raumes oder das Nichtvorhandensein in Verbindung mit geowissenschaftlicher Forschung direkte und indirekte Nachweise über Paläo-Klimavorgänge.

Die Arbeit von GIESSNER (1981) deutet die wenigen Informationen, die vor 1981 über die Klimaentwicklung des Raumes bekannt waren an. Lediglich drei Arbeiten werden zitiert (s. Abb. 3-8 IX), die zu recht unterschiedlichen Ergebnissen kommen (zumal hier auch Forschungen über das Niltal dargestellt werden) und nach dem heutigen Stand der Forschung von einer zu langen und zu starken Ausprägung der holozänen Feuchtphase ausgehen. GIESSNER (1981) betont, dass die Forschungen zur Klimaentwicklung seit Ende der 1970er Jahre erst begonnen haben und lediglich punktuelle Untersuchungen vorliegen, die sich kaum untereinander vergleichen lassen.

Die Zusammenstellung von JAKSCH (2001) zeigt, dass sich die Anzahl der Arbeiten seit den 1980er Jahren bis 2000 stark erhöht hat. Es wird mit Abbildung 3-9 deutlich, dass zum einen regionale Schwerpunkte gesetzt wurden, zum anderen die einzelnen

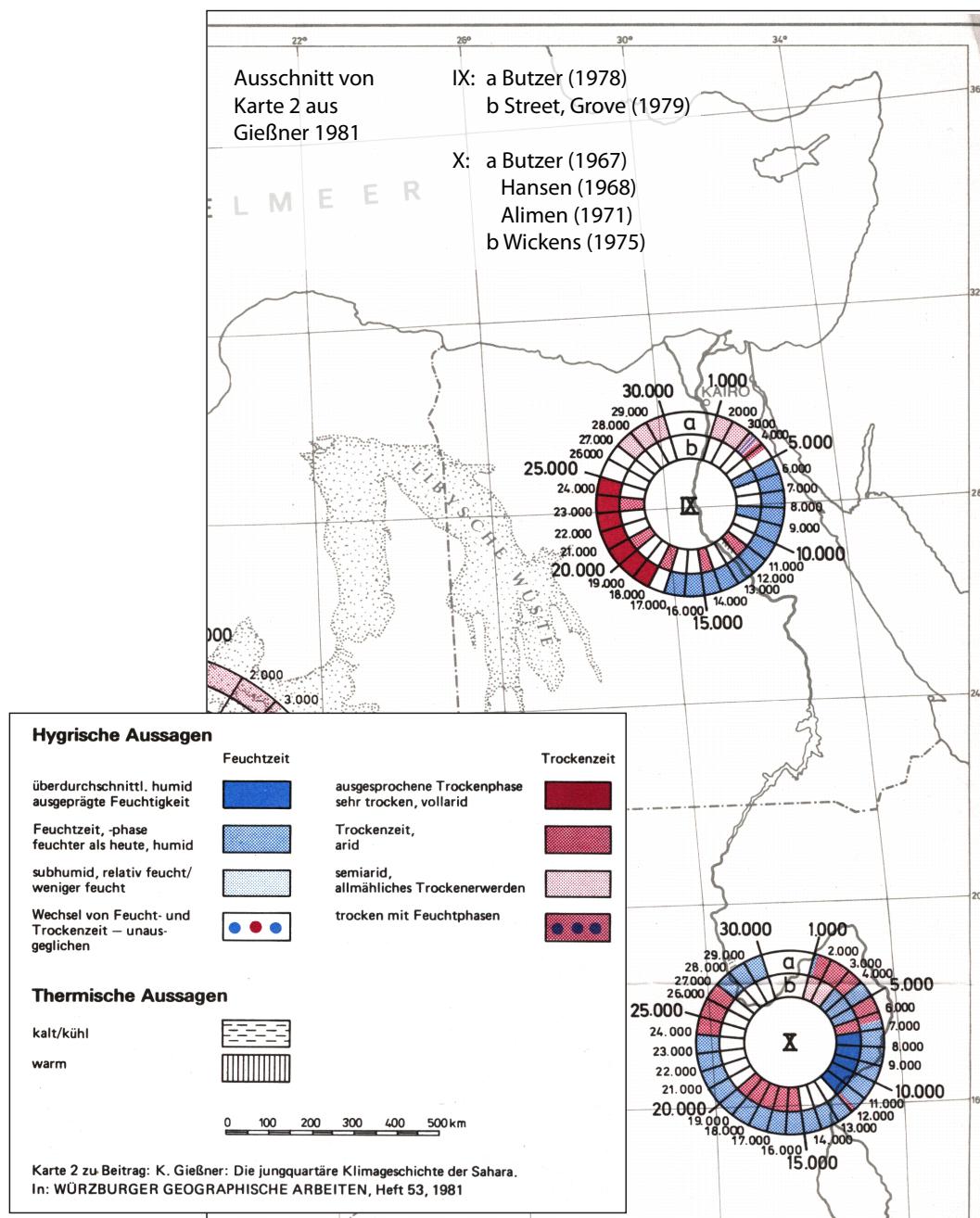


Abb. 3-8: Ausschnitt von Karte 2 aus GIEßNER (1981, verändert), der die Klimaentwicklung der Ost-sahara aus Literaturangaben zeigt.

Arbeiten nun besser vergleichbar sind sowie zu übereinstimmenden Ergebnissen bzw. Tendenzen kommen. Wesentlich sind die Arbeiten auf den SFB 69 (KLITZSCH & THORWEIHE 1999) zurückzuführen. Für den Bereich der Western Desert (In Abbildung 3-9 Kreise I und V) wird eine holozäne Feuchtphase von etwa 12.000 bis 4.000 BP mit einer Kernzeit von 9.000 bis 6.000 BP angegeben. Schon mit diesen Arbeiten deutet sich an, dass die Klimaentwicklung räumlich differenziert betrachtet werden muss. So kommen die Untersuchungen im Gilf Kebir (Kreis I in Abb. 3-9) zu anderen Ergebnissen

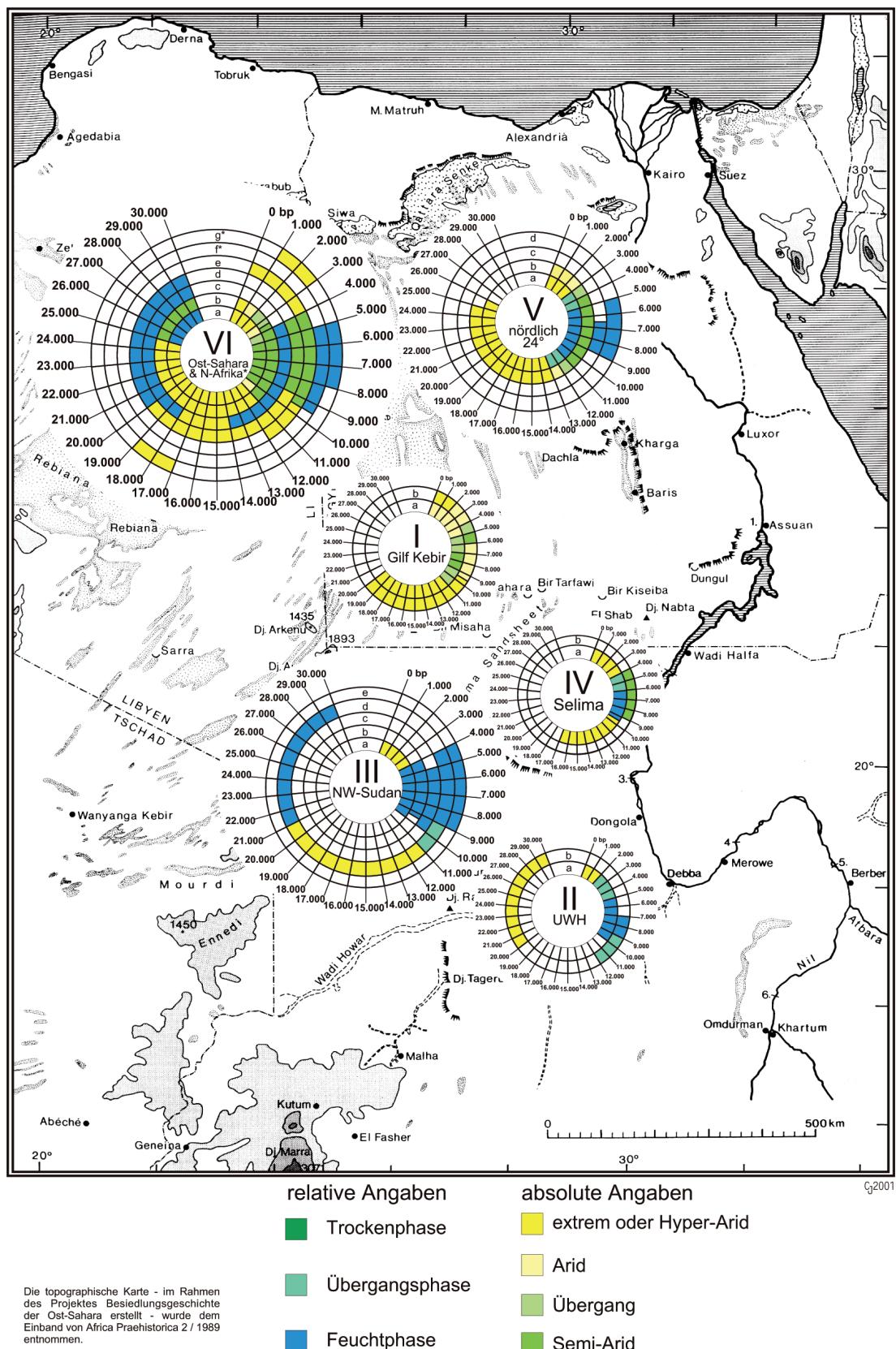


Abb. 3-9 Zusammenstellung der Klimaentwicklung der Ostsahara im Jungquartär. Darstellung entnommen aus JAKSCH (2001). Literaturangaben für I: a: PACHUR & RÖPER 1984, b: KRÖPELIN 1989; für V: a: PACHUR & BRAUN 1982, b: PACHUR & RÖPER 1984, c: DONNER 1998 d: BROOKES 1989. Weitere Informationen im Text.

als die Daten für die übrige Western Desert. Dies zeigt den großen Einfluss des Reliefs auf die Niederschlagsverteilung und die hydrologische Gunstsituation der Wadis in diesem Gebiet.

Als ein Ergebnis des SFB 389 präsentieren KUPER & KRÖPELIN (2006) eine Zusammenstellung der klimagesteuerten Besiedlungsgeschichte der Ostsahara in sechs Karten, die in Abbildung 3-10 wiedergegeben sind.

Für die einzelnen Zeiträume in Abbildung 3-10 werden folgende Informationen zusammengestellt (KUPER & KRÖPELIN 2006):

- A) Während des letzten glazialen Maximums und des ausgehenden Pleistozäns von 21.000 bis 8.500 BC war die Ostsahara außerhalb des Niltales und 400 km weiter südlich als heute unbewohnt.
- B) Mit dem abrupten Einsatz monsunaler Niederschläge seit 8.500 BC veränderte sich die hyperaride Wüste in eine savannenähnliche Umwelt, die vom prähistorischen Menschen schnell besiedelt und genutzt wurde;
- C) Nach 7.000 BC etablierte sich die menschliche Besiedlung über die gesamte Ostsahara in Verbindung mit dem Rinder-Pastoralismus;
- D) Zurückgehende Monsunniederschläge führten zum Beginn der Austrocknung der ägyptischen Sahara ab 5.300 BC. Die prähistorische Bevölkerung wurde in das Niltal und in ökologische Gunstregionen zurückgedrängt oder musste in die sudanesische Sahara ausweichen. Zusammenfallend mit den ersten Phasen der pharaonischen Bevölkerung im Niltal (die Hochkultur am Nil begann um etwa 3.000 BC) erreichte das Klima bis 3.500 BC wüstenhafte Bedingungen außerhalb des Niltales;
- E) Während der Phase zwischen 3.500 bis 1.500 BC waren begrenzte menschliche Aktivitäten außerhalb des Niltales und den Oasen auf das Durchqueren und auf Regionen mit temporärem Grundwasser beschränkt;
- F) Die klimagesteuerte Austrocknung der Ostsahara begrenzt die heutige Besiedlung auf das Niltal und die Oasen.

Aus diesen Darstellungen wird deutlich, dass die Besiedlungsgeschichte zum einen abhängig ist von der jährlichen Wasserverfügbarkeit durch Niederschlag und zum anderen von regionalen Gegebenheiten, also im Wesentlichen durch Gunstsituationen, die z.B. reliefbedingt sind. BUBENZER & RIEMER (2007) behandeln das Thema näher

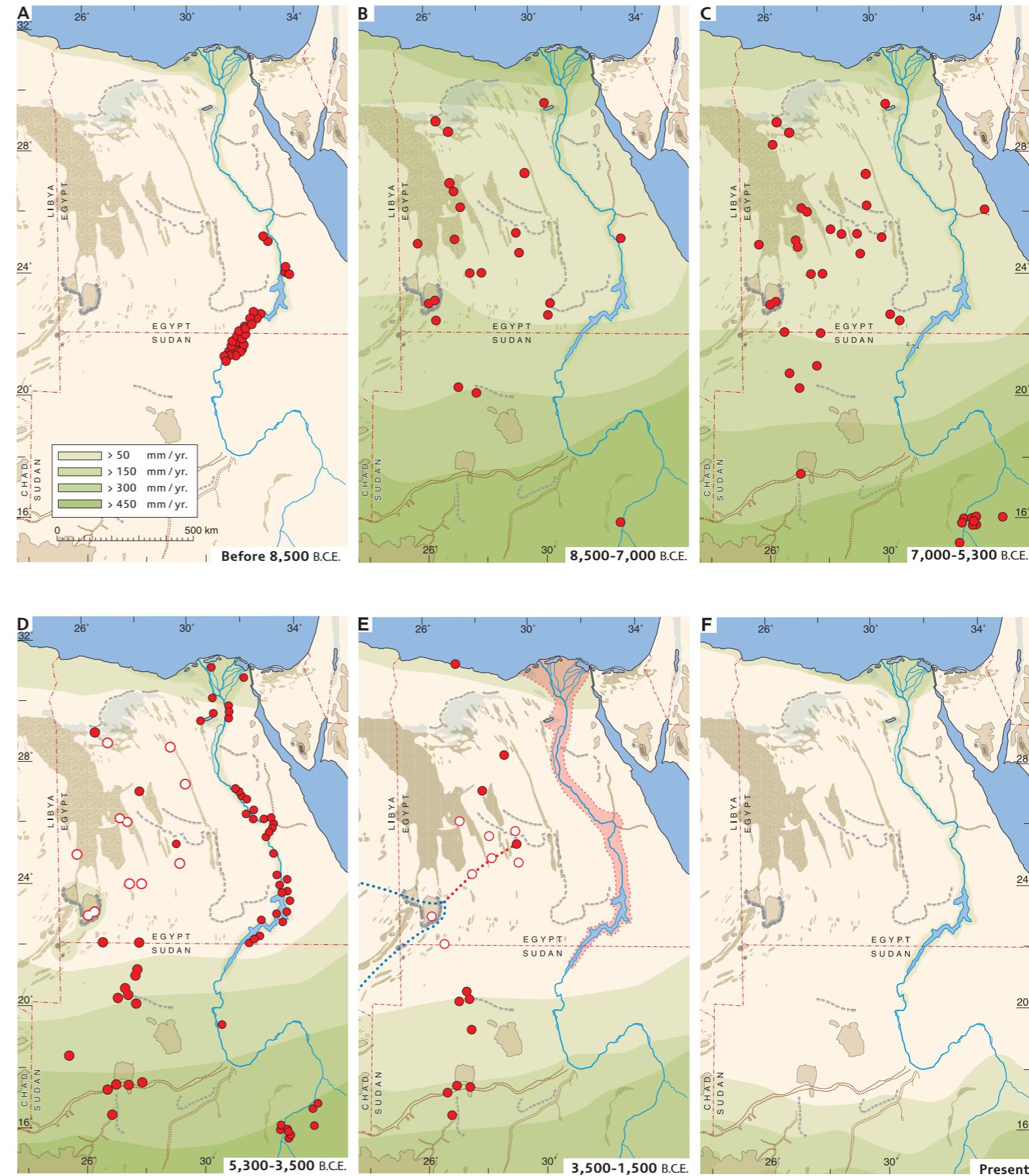


Abb. 3-10: Klimagesteuerte Besiedlungsgeschichte der Ostsahara während der Hauptphasen des Holozäns (nach KUPER & KRÖPELIN 2006), entnommen aus BUBENZER ET AL. 2007a). Die roten Punkte deuten auf Hauptbesiedlungsgebiete, die weißen Punkte auf archäobotanische Daten hin. Die Isohyeten wurden aus geologischen, archäozoologischen und archäobotanischen Daten abgeleitet. Weitere Informationen im Text.

und BOLTON & BUBENZER (2007) zeigen hierzu eine Zusammenstellung der durch Wasserzufluss bevorzugten Positionen in der Western Desert (s. Abb. 7-1).

Die holozäne Feuchtphase kann nach diesen neuesten Forschungsergebnissen auf den Zeitraum von 8.500-5.300 BC datiert werden (z.B. KUPER & KRÖPELIN 2006, BUBENZER & RIEMER 2007). In diesem Zeitraum hat sich der monsunale Sommerregen um 700-1000 km nach Norden verschoben (vgl. HAYNES 1987, HAYNES ET AL. 1989, NEUMANN 1989, PACHUR & HOELZMANN 2000, HOELZMANN ET AL. 2000), aber auch verstärkter Einfluss von Winterregen ist zumindest für einzelne Regionen wahrscheinlich (KINDERMANN ET AL. 2006, vgl. Kap. 6.1.1). Für einige Regionen der Ostsahara ist der Beginn der Austrocknung ab 5.300 BC nachgewiesen. Für andere Regionen, die klimatisch günstig liegen, beginnt die Austrocknung erst 300 Jahre später (Zusammenstellung der Nachweise und Orte z.B. in BUBENZER & RIEMER 2007). Somit konnten die seit GIESSNER (1981) gemachten z.T. noch vagen Zusammenstellungen hinsichtlich des zeitlichen Ablaufs der holozänen Feuchtphase, ihrer Intensität und Auswirkung auf die Besiedlungsgeschichte, seit den Ergebnissen des SFB 69 weiter präzisiert und räumlich differenziert werden.

4. Methoden und Methodenbeschreibung

Dieses Kapitel umfasst die Vorstellung der genutzten Methoden zur Rekonstruktion eines Nutzungspotentials, wobei der Schwerpunkt zunächst auf die Datenerfassung und -übernahme gelegt wird, da innerhalb des Teilprojektes E1, in dem diese Arbeit entstand, ein Teil der genutzten Daten aus anderen Teilprojekten des SFB 389 stammt. Darüber hinaus werden allgemeine Informationen über geographische Daten in Hinblick auf die Nutzung in Geographischen Informationssystemen präsentiert. Zur Relieferfassung im Untersuchungsgebiet wird auf die Methoden zur Ableitung aus Fernerkundungsdaten eingegangen und schließlich werden die Methoden zur Ableitung geomorphometrischer Informationen vorgestellt sowie einige Hinweise zu dem genutzten statistischen Verfahren angegeben.

4.1 Datenerfassung und Datenübernahme in einem interdisziplinären Umfeld

Innerhalb eines interdisziplinären Forschungsprojektes werden übergeordnete aber auch Teilfragestellungen von mehreren Disziplinen bearbeitet. Dabei werden zwangsläufig Daten anderer Forschergruppen übernommen oder Daten für andere Forschergruppen erhoben. Dies erfordert von allen Beteiligten eine hohe Interoperabilität, die insbesondere von verwendeten Metadaten aber auch z.B. von der Wortbedeutung in einzelnen Disziplinen abhängt. (Ein *Klassiker* ist in diesem Zusammenhang die Bedeutung des Begriffes *Landschaft* in den Geowissenschaften und Kulturwissenschaften. Die Beiträge in BOLLIG & BUBENZER (2008), zusammengestellt aus dem SFB 389, schlagen hier eine Brücke zwischen den Disziplinen.)

Im Bereich der Datenhaltung in Forschergruppen besteht jedoch auch die Problematik, sensible Daten überhaupt unveröffentlicht an Dritte weiterzugeben. In diesem Zusammenhang sind ein hohes Maß an Vertrauen und bestimmte Regeln der Zugriffskontrolle wichtig. Abbildung 4-1 zeigt ein vereinfachtes Schaubild des Zusammenhangs der Datenströme in Bezug auf Datensammlungstechniken im SFB 389 aus der Sicht des Datenmanagement-Teilprojektes E1.

Ebenfalls mit Abbildung 4-1 wird die Problematik der nicht einheitlichen Erfassung der Daten durch andere Teilprojekte, für die die Erhebungstechnik und Genauigkeit evtl. nicht bekannt sind, sowie die Einbeziehung von Fremddaten anderer Forscher-

gruppen oder kommerziell eingeworbener Daten, verdeutlicht. Dies erfordert neben einem hohen technischen Aufwand vor allem eine starke personelle Präsenz, um Datenqualität und Datenformat richtig einschätzen zu können (s.a. Kap. 4.1.4 und 4.1.5).

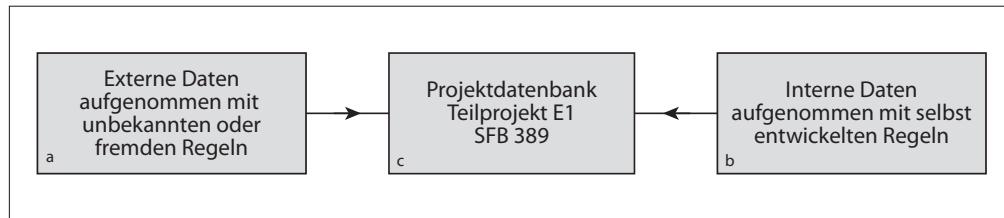


Abb. 4-1: Integration interner und externer Daten in die Projektdatenbank des Teilprojektes E1 des SFB 389 (eigener Entwurf).

Im Folgenden wird zunächst das Konzept geographischer digitaler Daten eingeführt und auch auf die neuesten Sichtweisen auf dieses Thema eingegangen. Darauf folgend werden Informationen aus der Praxis mit dem Umgang und der Erstellung geographischer Daten präsentiert und abschließend eine Evaluation des Teilprojektes E1 hinsichtlich des Umgangs mit Fremddaten vorgestellt.

4.1.1 Daten im Geographischen Informationssystem (GIS)

Das Geographische Informationssystem (GIS) unterscheidet grundsätzlich zwei Datenformate: Vektor- und Rasterdaten (z.B. BERNHARDSEN 1999, LIEBIG 1999).

- Rasterdaten repräsentieren abgespeicherte Informationen in regelmäßigen Zellen, die in einer Matrix angeordnet und georeferenziert sind. Die Georeferenzierung bezieht sich dabei meist auf die eindeutige Zuweisung einer Rasterzelle (Pixel) und Angaben über den Pixelabstand (in einer Längeneinheit, meist Meter oder Grad), sowie Anweisungen über das genutzte Koordinaten- system und die Projektion (LIEBIG 1999).
- Vektordaten, bestehend aus Lagepunkten und Verbindungslien, bieten die Möglichkeit große Mengen an Sachdaten (sog. Attributdaten) mit eindeutig definierten Positionen zu verknüpfen. Darüber hinaus ermöglichen geschlossene Linienzüge die Beschreibung von Flächen (BERNHARDSEN 1999).

Für beide Datentypen existieren unterschiedliche Speicherungsformen, wobei die Unterschiede bei Rasterdaten aufgrund des relativ einfachen Aufbaus meist nur durch

den Kompressionsalgorithmen zur Einsparung von Speicherplatz und der Form der Georeferenzierung bestehen. Da Vektordaten häufig als Modellierungsgrundlage dienen und für Abfragen genutzt werden, existieren hier sehr unterschiedliche Techniken zur Speicherung der Daten. Grundsätzlich benötigen Vektordaten einen geringen Speicherbedarf, aufgrund der Beziehungen (Topologien) der Daten untereinander sind jedoch die Speicherungstechniken relativ kompliziert, wenig transparent und richten sich nach dem Verwendungszweck der Daten.

BERNHARDSEN (1999) stellt die am meisten verbreiteten Speicherungstechniken vor und LIEBIG (2006) führt das zur Zeit neueste Modell, die ‚Geodatabase‘, ein, bei der die Speicherung der Geodaten nicht mehr in Raster- und Vektordaten getrennt ist, sondern die Daten unabhängig von ihrem eigentlichen Datenformat zusammen in relationalen Datenbanken abgelegt werden, in denen die räumliche Position eines Datenpunktes gleich geordnet ist mit anderen Attributdaten. Zwar werden die Rasterdaten immer noch physisch von den Vektordaten getrennt gespeichert, der Zugriff auf die Daten erfolgt jedoch innerhalb derselben Datenbank.

GOODCHILD ET AL. (1999) und GOODCHILD (2003) setzen sich grundsätzlich mit geographischen Informationen und deren Definitionen auseinander. Sie werden als „Informationen über die Merkmale und Erscheinungen in der Nähe der Oberfläche der Erde bezeichnet“ (GOODCHILD ET AL 1999). Der Unterschied zu anderen Informationsarten ist die Verknüpfung mit einem definierten Ort, sodass letztlich geographische Informationen auf ein „atomisiertes Element“ $\langle x, z \rangle$ (GOODCHILD 2003) zurückgeführt werden können, indem x eine Position in Raum und Zeit darstellt und z einzelne Attributinformationen zu x enthält. Diese Kodierung geographischer Informationen soll gewährleisten, dass die Weitergabe von Informationen unabhängig von der Quelle und dem Empfänger ist und somit fehlerfrei übertragen werden kann (GOODCHILD 2000). Eine Kommunikation ist somit auch über sonstige Sprachbarrieren hinaus theoretisch immer eindeutig möglich.

Die Informationen aus der Praxis in diesem Kapitel zeigen jedoch, dass trotz der scheinbaren Uniformität der Informationssprache Probleme auftreten können, die z.B. auf den *Dialekt* der ausführenden Software oder die Form, wie die oben angesprochenen Elemente x und z aufgenommen und abgespeichert werden, zurückzuführen ist.

4.1.2 Metadaten

Das Metadatenkonzept in Verbindung mit Geographischen Informationssystemen (GIS) ist ein noch junges Konzept. Jedoch weisen MAASS ET AL. (1996) schon darauf hin, dass mit der zunehmenden digitalen Datenmenge und der Zunahme der Anzahl der Nutzer ein Konzept gebraucht wird, Informationen über die zu nutzenden Daten verfügbar zu machen und dauerhaft mit den Daten zu speichern. Sie verstehen dabei die Metadaten als ein Leitsystem durch die Informations- und Datenflut. Dass es hierbei um nicht räumliche Daten geht, ist eher zweitrangig, da in heutigen Geographischen Informationssystemen der Raumbezug auch nur noch einen Parametersatz, der vergleichbar mit anderen Attributdaten ist (s. 4.1.1).

Mit der Einführung einer neuen Generation von Geographischen Informationssystemen der Firma ESRI (ArcGIS) werden Metadaten direkt mit den Geodatensätzen zusammen in einer exklusiven Datei abgespeichert. Die Metadaten können dabei nicht nur Informationen über Schlüsselworte, Status und verbundene Publikationen, sondern auch Beschreibungen zur Projektion, den benutzten Attributdaten oder die Aktualität der Daten beinhalten (VIENNEAU 2004, CONOLLY & LAKE 2006). Für die Erstellung und die einzelnen Kategorien der Metadaten existiert ein ISO-Standard (ISO 19115) des „Federal Geographic Data Committee“ (FGDC 2007). Ein ähnliches weit verbreitetes Beispiel für den Einsatz von Metadaten ist das Benutzen so genannter *Exif*-Informationen („Exchangeable Image File Format“) (JEIDA 2007) bei Digitalfotos, die Informationen über ein mit einer Digitalkamera aufgenommenes Foto enthalten. Hier werden bspw. das Modell der Kamera, die Belichtungszeit, die Blende, der Blitzstatus, das Kompressionsverfahren aber auch z.B. die geographische Position des aufgenommenen Bildes bei neuerdings angebotenen GPS-Digitalkameras festgehalten und direkt in das Jpeg-Bildformat abgespeichert. Wie wichtig das Thema *Metadaten* in den letzten Jahren geworden ist, zeigen Arbeiten über die Verwaltung von *Metadaten*, das so genannte *Metadatenmanagement*, da neben der wachsenden Flut von digitalen Daten auch die Menge der *Metadaten* soweit angeschwollen ist, dass effektive Werkzeuge zur Nutzung entwickelt werden müssen (vgl. z.B. AUTH 2003).

4.1.3 Einsatz von Projekt- und Fremddaten – einige Beispiele

Innerhalb des Teilprojektes E1 des SFB 389 werden eigene Daten erhoben sowie Daten aus anderen Projekten und Fremddaten übernommen. Hierbei lassen sich Daten unterscheiden, bei denen der Datenerhebende erreichbar ist und Daten, die bspw. von Institutionen übernommen werden und deren Quelle nicht eindeutig ist (vgl. Kap. 4.1).

Ein Beispiel für Daten, die innerhalb des SFB 389 erzeugt wurden, ist das *Fahrtenbuch*, das innerhalb des Teilprojektes A1 aufgenommen wurde. Es umfasst GPS-Koordinaten mit Attributdaten der SFB-Expeditionen seit 1996. Aufgrund des vorgefertigten Rasters der zu erfassenden Daten ist die Qualität der aufgenommenen Daten gleichbleibend, zumal fehlerintensive Daten wie Koordinate, Datum und Uhrzeit digital übertragen werden. Einzig das Ausfüllen von frei eingebaren Textspalten bietet eine Möglichkeit der Fehlerquelle. Tabelle 4-1 zeigt einige gekürzte Datenzeilen des Datensatzes.

Tab. 4-1: Ausschnitt aus dem Fahrtenbuch (Teilprojekt A1, SFB 389, verändert) mit einigen Attributspalten (Auswahl). Die Koordinatenangabe ist auf eine Kommastelle gekürzt.

Id	Garmin	Wpt	Nord	Ost	Datum	Kfz	Code	Beschreibung
112	A	1641	26.0	25.6	15.03.00	Ä1	Geo	8. Geotransekt 26° Nord
113	A	1642	26.0	25.6	15.03.00	Ä1	Geo	Südende Düne, eine Gasse weiter östlich
114	A	1643	26.2	25.6	15.03.00	Ä1	Fb	200m weiter westlich kleiner Schlagplatz mit einer großen Klinge und Kern, Abschläge, 1 Reibstein, Flint (?), reduzierte Schlagflächen

Ein Beispiel für die Übernahme von Fremddaten sind die Daten des National Geospatial-Intelligence Agency (NGA 2007a), die einen auf Staaten aufgeteilten Namensdatensatz bereitstellen (NGA 2007b), der bspw. für Ägypten 42.759 Einträge umfasst (Letzte Aktualisierung am 28. 02. 2007), die bis zu 27 Attributinformationen enthalten. Auch hier sind die Daten durch Kategorien sehr stark reglementiert und meist ist sogar der zu benutzende Variablenraum vorgegeben. Beispielsweise dürfen für die ‚Feature Classification‘ (die Hauptklassifikation des Datenpunktes) nur folgende Einträge genutzt werden:

- A = 'Administrative region type feature'
- P = 'Populated place type feature'
- V = 'Vegetation type feature'
- L = 'Locality or area type feature'
- U = 'Undersea type feature'
- R = 'Streets, highways, roads, or railroad type feature'
- T = 'Hypsographic type feature'
- H = 'Hydrographic type feature'
- S = 'Spot type feature'

Leider sind zu den Daten keine Quellen verfügbar; es ist also unklar, wann die Daten erhoben wurden, von wem, mit welcher Genauigkeit, usw. Da auch die Institution unbekannt ist, die die Daten erhoben hat, lässt sich über die Qualität der Daten ohne weiteres nichts feststellen. Die Daten wurden somit lediglich als Zusatzinformationen mit einem entsprechenden Vermerk auf topographischen Karten genutzt.

Abbildung 4-2 zeigt einen Ausschnitt einer im Teilprojekt E1 des SFB 389 angefertigten topographischen Karte für den Einsatz im Gelände. Die Nutzung der Karten im Feld belegt einerseits die stark schwankende Qualität der Daten. Andererseits stimmt die Lage der Daten nicht oder die Schreibweise ist ungewöhnlich bzw. vor Ort nicht bekannt. Die Daten können aber auch wichtige Hinweise zu bestimmten Gebieten

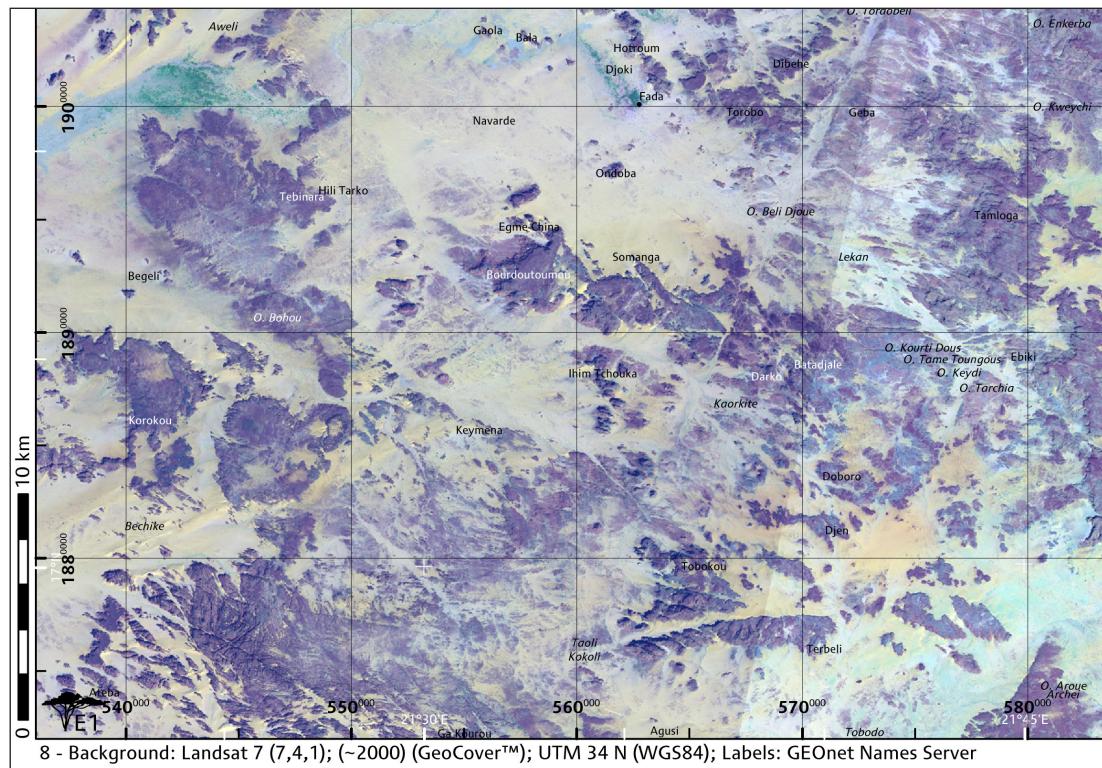


Abb. 4-2: Ausschnitt aus einer Routenkarte des Tschad mit eingetragenen Datenpunkten des 'GEONet Names Server'. Weitere Informationen im Text. (eigener Entwurf)

liefern, die von der Lokalbevölkerung bekannt werden. Das Beispiel zeigt, dass der Einsatz von Fremddaten nur dann sinnvoll, bzw. diese vollwertig einsetzbar sind, wenn die Metadaten hinsichtlich Qualität und Datenformaten vollständig sind.

4.1.4 Probleme bei der Erhebung und der Übernahme von Daten

Das größte Hindernis bei der technischen Übernahme von Daten ist das Vorhandensein unterschiedlicher Datenformate für Geodaten. Dieses zunächst rein technisch anmutende Problem der Konversion von Daten ist jedoch innerhalb eines interdisziplinär arbeitenden Projektes akut, da aufgrund der Vielfalt der am Markt erhältlichen Softwarelösungen in einer Gruppe von Wissenschaftlern unterschiedlicher Fachrichtungen auch unterschiedliche Software eingesetzt wird, die z.T. nicht direkt untereinander kompatibel ist. Die Interoperabilität ist damit nicht gewährleistet und letztlich ist es dem *Datensammler* überlassen, Techniken zu entwickeln, um die heterogene Daten in einen homogenen Datenpool zu überführen, da den Nutzern das Abliefern der Daten in einem bestimmten der vielen möglichen Datenformate nicht zuzumuten ist.

Die häufigste Form von Datenerhebungen in allen im SFB 389 beteiligten Teilprojekten ist das Erfassen von Punktdaten mit Attributinformationen. Aufgrund unterschiedlicher Koordinatenerfassung kann es jedoch auch bei dieser einfachen Erfassung zu Problemen kommen, wenn dem Nutzer bspw. nicht mehr bewusst ist, ob Koordinaten in Dezimalminuten oder Minuten/Sekunden oder auf der Grundlage welches Erdspäheroiden erhoben wurden. Dies macht deutlich, dass auch bei einer automatischen Erfassung und Weiterverarbeitung von Geodaten eine genaue Kontrolle der Daten unerlässlich ist.

4.1.5 Evaluation der Interoperabilität im Teilprojekt E1 des SFB 389

Eine Diplomarbeit, angefertigt am Geographischen Institut der Universität zu Köln, beschäftigte sich mit dem Thema, inwieweit raumbezogene Daten, deren semantische Heterogenität sehr groß ist, überein gebracht werden können, und welche Techniken und Innovationen bestehen, um diese Heterogenität zu überwinden oder nicht

entstehen zu lassen (SCHÜTTENBERG 2004). In diesem Zusammenhang ist durch SCHÜTTENBERG (2004) mit einem Experteninterview das Teilprojekt E1 *GIS-gestützter Atlas Holozäner Nutzungspotentiale ausgewählter Untersuchungsregionen* aus dem interdisziplinär angelegten SFB 389 untersucht worden, da hier Daten aus unterschiedlichen Disziplinen zur Analyse bestimmter Fragestellungen genutzt werden.

Im Fall des SFB 389 können die beteiligten Fachbereiche (z.B. Botanik oder Ethnologie) als eine „geographische Informationsgemeinschaft“ (SCHÜTTENBERG 2004) bezeichnet werden, deren Informationen über die Rauminformation verknüpft sind. Aufgrund der typischerweise bestehenden Eigenheiten der einzelnen Fachbereiche, bezogen auf Geoinformationen, ist dadurch von Problemen auszugehen. Im Teilprojekt E1 konnten, ohne die technischen Neuerungen zur Überwindung semantischer Heterogenität nutzen zu können (bspw. spezielle Software zur Übertragung von Daten aus unterschiedlichen Disziplinen), die semantischen Heterogenitäten weitgehend überwunden werden. Dies gelang aber nur durch den Einsatz von „man-power“ (SCHÜTTENBERG 2004), wodurch der Überblick über die Daten und die Zusammenhänge bzw. Konvertierungen behalten wurde und nicht durch den Einsatz automatischer Erfassungssysteme.

Damit zeigt sich, dass in einem interdisziplinären Umfeld eine automatische Datenzusammenführung ohne Prüfungsinstanzen einen hohen Qualitätsverlust erleiden kann und ein Mehrwert über die reine Datensammlung hinaus zweifelhaft ist.

4.2 Relieferfassung des Untersuchungsgebietes mit Fernerkundungsdaten

In diesem Kapitel werden die Methoden vorgestellt, mit denen die digitalen Höhendaten für das Untersuchungsgebiet erzeugt wurden.

Für die Western Desert Ägyptens lagen bis zu Beginn des Jahrhunderts keine flächendeckenden digitalen Höhenmodelle vor, die eine Rasterweite geringer als 1000 m aufwiesen. Die einzigen flächenhaften Höheninformationen stammen aus russischen topographischen Militärkarten aus den 1980er Jahren, die für Teile des Untersuchungsgebietes bis zum Maßstab 1:100.000 (meist jedoch nur im Maßstab 1:250.000) seit einigen Jahren frei verkäuflich sind (z.B. DÄRR 2007) und Höhenlinien unterschiedlicher Äquidistanzen aufweisen.

4.2.1 Grundlagen

Zur Erfassung des Reliefs mittels Fernerkundungsdaten stehen zwei unterschiedliche Aufnahmesysteme zur Verfügung. Passive Sensoren (Kap. 4.2.1.1) erzeugen zweidimensionale Bilder, die durch Überlagerung genutzt werden, um Höhendaten abzuleiten. Für gewöhnlich ist die Erzeugung von Höhendaten nur eine untergeordnete Aufgabe von passiven Sensoren. Aktive Sensoren (Kap. 4.2.1.2) werden meist direkt genutzt, um Höhendaten zu erzeugen. Ihre Verbreitung ist wesentlich geringer als die der passiven Sensorik.

4.2.1.1 Passive Sensoren

Als passive Sensoren werden in der Fernerkundung Aufnahmesysteme bezeichnet, die die reflektierte Strahlung der Sonne vom Erdboden erfassen. Hinzu kommt die Thermalstrahlung der Erdoberfläche, die aufgrund des warmen Erdinneren abgestrahlt wird (kontinuierlich durch den Erdboden und diskret über Vulkanausbrüche), unterschiedlich temperierte Meeresströmungen, Brände und anthropogen gesteuerte Wärme z.B. über das Aufheizen der Städte (LILLESAND ET AL. 2004).

Da sich die Satellitensysteme außerhalb der Erdoberfläche in mehreren 100 km Höhe befinden, wirkt sich die Absorptionsfähigkeit der Atmosphäre auch auf die Strahlung aus, sodass sich eine Erfassung der Strahlung auf bestimmte charakteristische Bereiche beschränken muss, die entweder diskret in schmalen Bändern oder kontinuierlich in großen Bereichen erfasst werden. Abbildung 4-3 gibt einen Überblick über die wellenlängenabhängige Globalstrahlung der Sonne und die Absorptionsbänder der Atmosphäre. Das sichtbare Licht (von 380 nm bis 780 nm) umfasst nur einen sehr schmalen Bereich dieser Strahlung.

Abbildung 4-3 zeigt neben der Strahlungsverteilung auch die in zwei populären Satellitensystemen genutzten Aufnahmebänder, die mit den atmosphärischen Fenstern korrelieren und mit Abkürzungen versehen werden. Das ‚very near infrared‘ (VNIR) reicht noch in das sichtbare Licht hinein, das ‚short wave infrared‘ (SWIR) umfasst den Bereich um 2 μm und das ‚thermal infrared‘ (TIR) den Bereich jenseits von 8 μm bis ca. 14 μm , die ungefähre Maximalwellenlänge für passive Systeme (LILLESAND ET AL. 2004). Abbildung 4-3 zeigt ebenfalls den Fortschritt in der

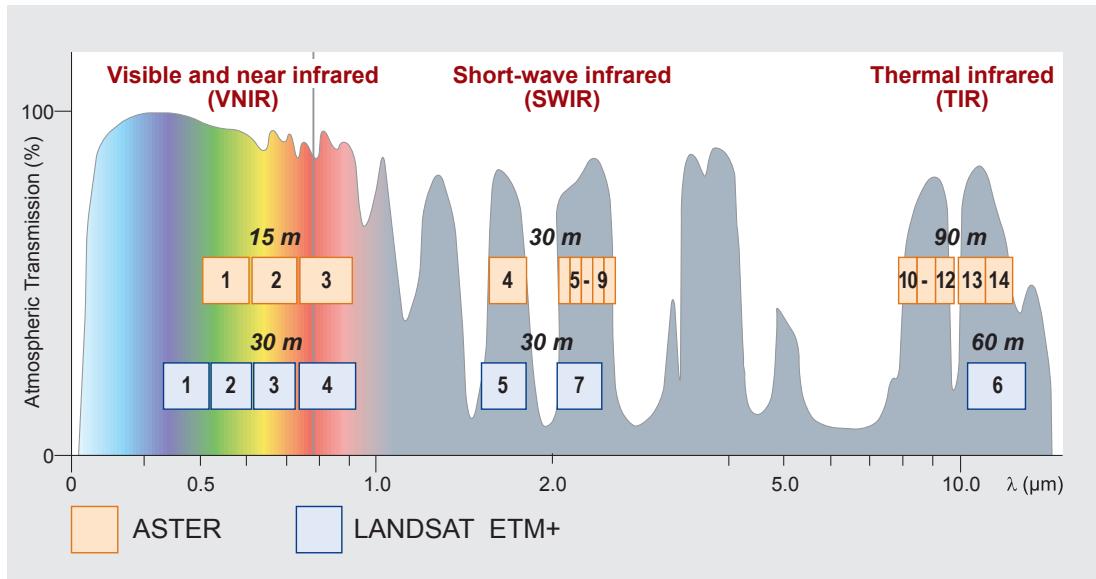


Abb. 4-3: Überblick über die Globalstrahlung der Sonne auf der Erdoberfläche mit ihrer Durchlässigkeit durch die Atmosphäre in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Die Boxen repräsentieren die einzelnen Empfängerbereiche der Satellitenkanäle für ASTER und Landsat 7 (ETM+) mit ihren räumlichen Auflösungen. Deutlich erkennbar ist die höhere Bandanzahl und spektrale Auflösung des ASTER-Systems (bspw. ASTER-Band 5-9 gegenüber Landsat-Band 7) und die höhere räumliche Auflösung im sichtbaren Bereich (verändert nach KÄÄB ET AL. 2002).

Fernerkundungsaufnahmetechnik der letzten Jahre, indem die Auflösung der einzelnen Bänder erhöht wurde, bei gleichzeitiger Verkleinerung der Bandbreite der einzelnen Kanäle (was einer Erhöhung der spektralen Auflösung entspricht). So umfasst der SWIR-Bereich im Landsat-System zwei Kanäle, im ASTER-System bereits sechs Kanäle, deren Auflösung im VNIR-Bereich verdoppelt worden ist. Die geringere Auflösung der TIR-Bänder resultiert aus der hohen spektralen Auflösung des Systems. Spezielle Satellitensysteme für den VNIR-Bereich (IKONOS oder QuickBird) erreichen weitaus höhere Auflösungen, die bis 61 cm für ein kontinuierliches Graustufenband des ganzen sichtbaren Bereichs erreichen können. Schon in 2008 wird es hier noch weitere Steigerungen geben. Der Satellit WorldView I mit 50 cm Auflösung ist bereits im Orbit und wird ab 2008 erste Bilder liefern (WORLDVIEW I 2007). Diese Satellitensysteme eignen sich jedoch nur sehr bedingt für eine multispektrale und gar nicht für eine hyperspektrale Analyse (WALDHOF 2006). Hierfür existieren exklusive Satellitensysteme, die große Spektralbereiche mit einer hohen spektralen Auflösung (mit geringer aber konstanter räumlicher Auflösung) aufnehmen können. Eines dieser Systeme ist bspw. Hyperion (WALDHOF 2006) auf dem Earth Observing-1 Satelliten der NASA.

4.2.1.2 Aktive Sensoren

Bei Radarsystemen, die zur Fernerkundung genutzt werden, handelt es sich um aktive Systeme. Einige Ausnahmen sind Satelliten, die natürliche Radarwellen der Erde erfassen (LILLESAND ET AL. 2004). Die benutzten Wellenlängen sind dabei mit 1 mm bis 1 m etwa $2,5 \times 10^6$ -mal länger als die des sichtbaren Lichts und werden als Mikrowellen bezeichnet (*Mikro* sind dabei nicht die Wellen sondern die Frequenz als Kehrwert der Wellenlänge). Die in der vorliegenden Arbeit genutzten SRTM-Daten nutzen eine Wellenlänge zwischen 3,75 cm und 7,5 cm (also etwa 5 GHz) und befinden sich damit drei Größenordnungen entfernt von gemessenen Thermalspektren passiver Systeme (vgl. Abb. 4-4).

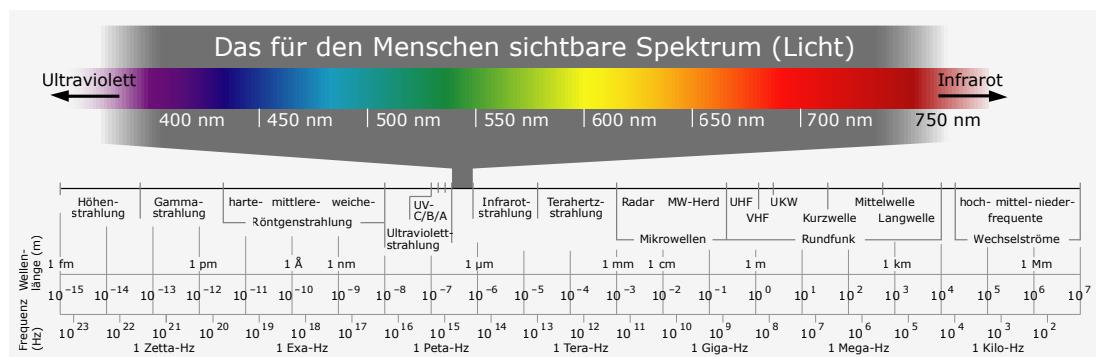


Abb. 4-4: Ausschnitt aus dem elektromagnetischen Spektrum mit den für das menschliche Auge sichtbaren Wellenlängenbereichen (verändert nach WIKIPEDIA 2007b).

Nach LILLESAND ET AL. (2004) existieren zwei Unterschiede in der Nutzung von Radarwellen in der Fernerkundung gegenüber der Nutzung des sichtbaren Lichts:

- (1) Mikrowellen durchdringen die Atmosphäre ungestört, werden damit weder gestreut oder durch Wetterphänomene verändert.
 - (2) Die Reflexionen von Mikrowellen vom Material des Erdbodens lassen sich nicht mit denen des sichtbaren Lichtes vergleichen.

Aufgrund der Aufnahmetechnik und der genutzten Wellenlgen (die Wellenlge steht in direkter Beziehung zur effektiven Lnge der zu nutzenden Antenne) sind die Aufnahmeauflsungen erheblich geringer als bei der Nutzung des sichtbaren Lichts (s. Kap. 4.2.1.1).

4.2.2 Die Aufnahmesysteme ASTER und SRTM

Der Abdeckungsbereich für Fernerkundungsdaten im SFB 389 umfasst einen Großteil der Ostsahara und des südlichen Afrikas. Um diese großen Flächen abdecken zu können, musste auf für Forschung und Lehre kostenfreie Daten zurückgegriffen werden, die dennoch eine hohe Auflösung bei möglichst vollständiger Abdeckung und Aktualität aufweisen sollten.

Fasst man die frei verfügbaren Höhenmodelle zusammen, die eine weltweite oder nahezu weltweite Abdeckung aufweisen (Tab. 4-2), so wird deutlich, dass für die in dieser Arbeit benötigte Auflösung nur die Daten der ‚Shuttle Radar Topography Mission‘ (SRTM) und des ‚Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer‘ (ASTER) infrage kommen.

Im Teilprojekt E1 des SFB 389 hat sich die Kombination aus ASTER- und SRTM-Daten als sehr erfolgreich herausgestellt. ASTER-Daten liefern eine hohe räumliche Auflösung hoher Aktualität mit der zusätzlichen Option der Erzeugung von Höhendaten.

Tab. 4-2: Zusammenstellung hochauflösender flächenhaft verfügbarer für Forschung und Lehre kostenloser digitaler Höhenmodelle mit einigen Charakteristika. Die Modelle SRTM-3 und ASTER werden detailliert in Kapitel 4.2.2 vorgestellt. (eigene Erhebung)

Name	Auflösung	Abdeckung	Bemerkung
Etopo 5 (1993) Etopo 2 (2001)	5' (~10 km) 2' (~4 km)	Weltweit	Geländemodell inklusive Meeresböden und Polregionen.
GTOPO 30 (1996)	30'' (~1 km)	Weltweit	Auflösung und Qualität sind in der heutigen Zeit für Untersuchung in einem größeren Maßstab als 1:1.000.000 nicht mehr lohnenswert.
SRTM-1 (aufgenommen 2000)	1'' (~30 m)	USA	Mit dem ‚National Elevation Dataset‘ (NED) ist ein gleich aufgelöstes frei verfügbares Modell für die USA bereits vorhanden.
SRTM-3 (aufgenommen 2000; 2004 verfügbar)	3'' (~90 m)	60°N-54°S	Nutzbar mit Einschränkungen bzgl. Datenqualität und Datenlücken. Anwendungen in der Literatur vorhanden; Abschätzungen zur Genauigkeit jedoch kaum.
ASTER- Höhendaten (seit 2000)	30 m	Weltweit, wenn Region wolkenfrei aufgenommen	Für den Einsatz in Forschung und Lehre kostenfrei (bei eigener Erstellung hohe Softwarekosten). Untersuchungen zur Nutzbarkeit für verschiedene Fragestellung und für verschiedene Maßstäbe sind vorhanden

Die SRTM-Daten zeigen eine sehr gute räumliche Abdeckung bei gleichzeitig relativ hoher Auflösung und Qualität. Im Folgenden werden beide Systeme detailliert vorgestellt und in Kapitel 5 ihre Nutzbarkeit und Qualität untersucht.

4.2.2.1 Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer⁷ (ASTER)

Das ‚Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer‘ (ASTER) Aufnahmegerät ist ein Mehrkamerasystem, dass sich an Bord des NASA EOS TERRA-Satelliten befindet (YAMAGUCHI ET AL. 1998, WELCH ET AL. 1998; Abb. 4-5) und 1999 erfolgreich in einen polumlaufenden Orbit gebracht werden konnte.

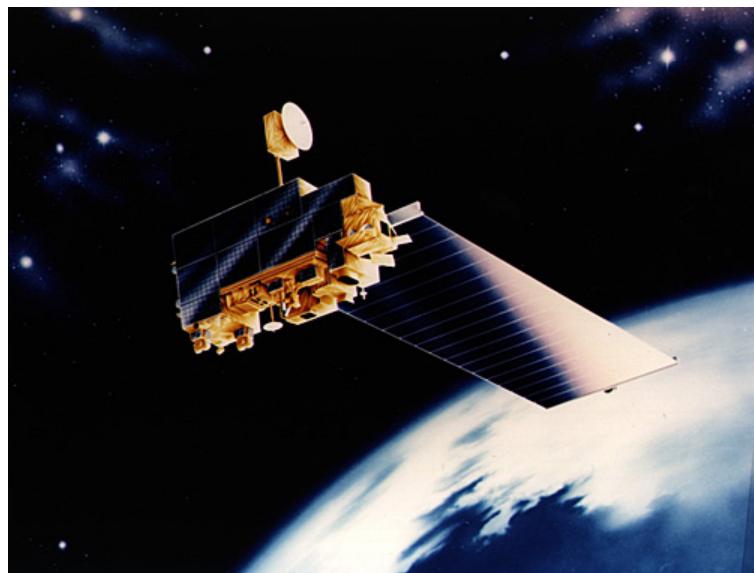


Abb. 4-5: Der TERRA-Satellit in einer Bildmontage mit den einzelnen Instrumenten (ASTER, CERES, MISR, MODIS und MOPITT) (NASA-TERRA 2007).

Neben dem in Japan konstruierten System befinden sich weitere Kamerasysteme mit unterschiedlichen Eigenschaften auf derselben Plattform. Tabelle 4-3 gibt einen Überblick über die weiteren Systeme und zeigt einige ihrer Eigenschaften auf.

Die Aufgaben der ASTER-Mission, zusammengestellt nach YAMAGUCHI ET AL. (1998) und Jet Propulsion Laboratory (JPL 2007a), sind die Untersuchung und Aufnahme von

- Klimavorgängen in der Atmosphäre,
- Vegetations- und Ökosystemdynamik,

- Vulkantätigkeiten,
- Naturkatastrophen,
- Aerosolen und Wolken,
- des Kohlenstoffkreislaufs in den Ozeanen,
- hydrologischen Vorgängen
- der Geologie und den Böden und
- der Landoberfläche und deren Veränderung.

Dabei sollen drei Maßstabsebenen zum Teil oder vollständig abgedeckt werden. Im globalen Maßstab die Erzeugung einer flächendeckenden Karte. Regionale Überwachungsstudien und lokale Teststudien für ausgesuchte Wissenschaftler (YAMAGUCHI

Tab. 4-3: Aufnahmesysteme der TERRA-Satelliten mit einigen Eigenschaften nach TERRA (2007).

Name	Spektralbereich	Auflösung	Einsatzzweck
ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)	<ul style="list-style-type: none"> • VNIR: 0,5-0,9 μm • SWIR: 1,6-2,5 μm • TIR: 8-12 μm 	<ul style="list-style-type: none"> • 15 m (VNIR: 3 Bänder), • 30 m (SWIR: 6 Bänder), • 90 m (TIR: 5 Bänder) 	<ul style="list-style-type: none"> • Oberflächentemperaturbestimmung • Digitale Höhenmodelle • Vegetationskarten hoher Auflösung
CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System)	<ul style="list-style-type: none"> • Shortwave: 0,3-5,0 μm • Longwave: 8-12 μm • Total: 0,3->200 μm 	• 20 km	<ul style="list-style-type: none"> • Auswertung von Zirkulationsmodellen
MISR (Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer)	<ul style="list-style-type: none"> • 446 nm • 558 nm • 672 nm • 866 nm 	<ul style="list-style-type: none"> • 275 m off-nadir, • 250 m nadir 	<p>Messung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • atmosphärischer Schwebstoffen • Anzahl, Typ und der Höhe von Wolken • Verteilung der Landbedeckung
MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer)	• 0,4-14,4 μm	<ul style="list-style-type: none"> • 250 m (2 Bänder), • 500 m (5 Bänder), • 1000 m (29 Bänder) 	<p>Messung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Oberflächentemperatur • Ozean-Farbe • Vegetation und deren Änderungen • Wolkenformen • Schwebstoffkonzentration und Eigenschaften
MOPITT (Measurements Of Pollution In The Troposphere)	<ul style="list-style-type: none"> • 2,3 μm (CH_4), • 2,4 μm (CO), • 4,7 μm (CO) 	• 22 km	<p>Messung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kohlenmonoxid und Methan in der Troposphäre • CO- und Methanverteilung

ET AL. 1998). Das ehrgeizige Ziel dabei ist, neben der Aufnahme der Erdoberfläche sowie der Erfassung von Meeres- und Atmosphärendaten, auch deren Interaktion besser verstehen zu können. Die Missionslänge, die anfänglich auf sechs Jahre ausgelegt war, wird bereits deutlich überschritten, da das Instrument weiterhin zuverlässig Daten aufnimmt.

Die ASTER-Daten schließen deutlich an andere Fernerkundungsdaten ähnlicher Auflösung an. Die Spektralbereiche der einzelnen Kamerasysteme sind vergleichbar mit denen der einzelnen Landsat-Missionen und ebenfalls vergleichbar mit denen des ‚Japanese Earth Resource Satellite‘ (JERS-1) (WELCH ET AL. 1998). Den vierzehn Spektralbändern des ASTER-Systems werden dabei unterschiedliche Aufgaben zugedacht. Das VNIR-System („Very Near Infra Red“) mit seiner hohen räumlichen Auflösung im sichtbaren Licht wird zur topographischen Aufnahme genutzt. Das SWIR-System („Short Wave Infra Red“) ist geeignet zur Bestimmung der Lithologie und des Bodens. Das TIR-System („Thermal Infra Red“) kann ebenfalls zur Charakterisierung des Oberflächengesteins genutzt werden, ermöglicht darüber hinaus aber auch die direkte Temperaturmessung der Atmosphäre und Erdoberfläche. Tabelle 4-4 gibt einen Überblick über die genutzten Spektralbereiche deren Auflösung und Bandbreite, Abbildung 4-6 zeigt schematisch die einzelnen Aufnahmeinstrumente.

Im Gegensatz zu den Landsat-Missionen sind die einzelnen Hauptbänder des SWIR- und TIR-Systems in mehrere Bänder aufgespalten (s. Abb. 4-3). Dies ermöglicht durch Bandkombinationen mehr Analysemöglichkeiten.

Tabelle 4-6 gibt einen orientierenden Überblick über die bisher erschienenen Anwendungen zu den SWIR- und TIR-Daten. Hierbei steht die Charakterisierung des oberflächennahen Gesteins bzw. der Landoberfläche im Vordergrund.

Das VNIR-System enthält mit dem Kanal 3b (vgl. Tab. 4-4) einen weiteren Kanal, der die gleiche spektrale Auflösung wie der 3n-Kanal hat. Dieser ‚backward‘-Kanal, der von einer weiteren Kamera erzeugt wird (vgl. Abb. 4-6 VNIR), stellt zu jedem ‚nadir‘-Kanalbild ein um 27,9° geneigtes Bild her, sodass zwei identische Regionen zeitnah unter verschiedenen Winkeln zur Verfügung stehen (s. Abb. 4-7). Weitere Angaben zur Charakteristik der Stereoaufnahmen des ASTER-Sensors bietet Kapitel 4.2.2.3.

Das ASTER-Kamerasystem bietet somit aufgrund der drei unterschiedlichen Aufnahmesysteme, der großen spektralen Bandbreite und Auflösung sowie der Möglichkeit

Tab. 4-4: Basisdaten des ASTER-Aufnahmesystems nach YAMAGUCHI ET AL (1998).

Kamerasystem	Band-Nummer	Spektraler Bereich (μm)	Auflösung (m)	Signal-Bandbreite (bit)		
VNIR	1	0,520-0,600	15	8		
	2	0,630-0,690				
	3n	0,780-0,860				
	3b	0,780-0,860				
SWIR	4	1,600-1,700	30	8		
	5	2,145-2,185				
	6	2,185-2,225				
	7	2,235-2,285				
	8	2,295-2,365				
	9	2,360-2,430				
TIR	10	8,125-8,475	90	12		
	11	8,475-8,825				
	12	8,925-9,275				
	13	10,25-10,95				
	14	10,95-11,65				
Bildbreite		60 km				
Stereo Basis zu Höhe Verhältnis		0,6				
Masse		406 kg				

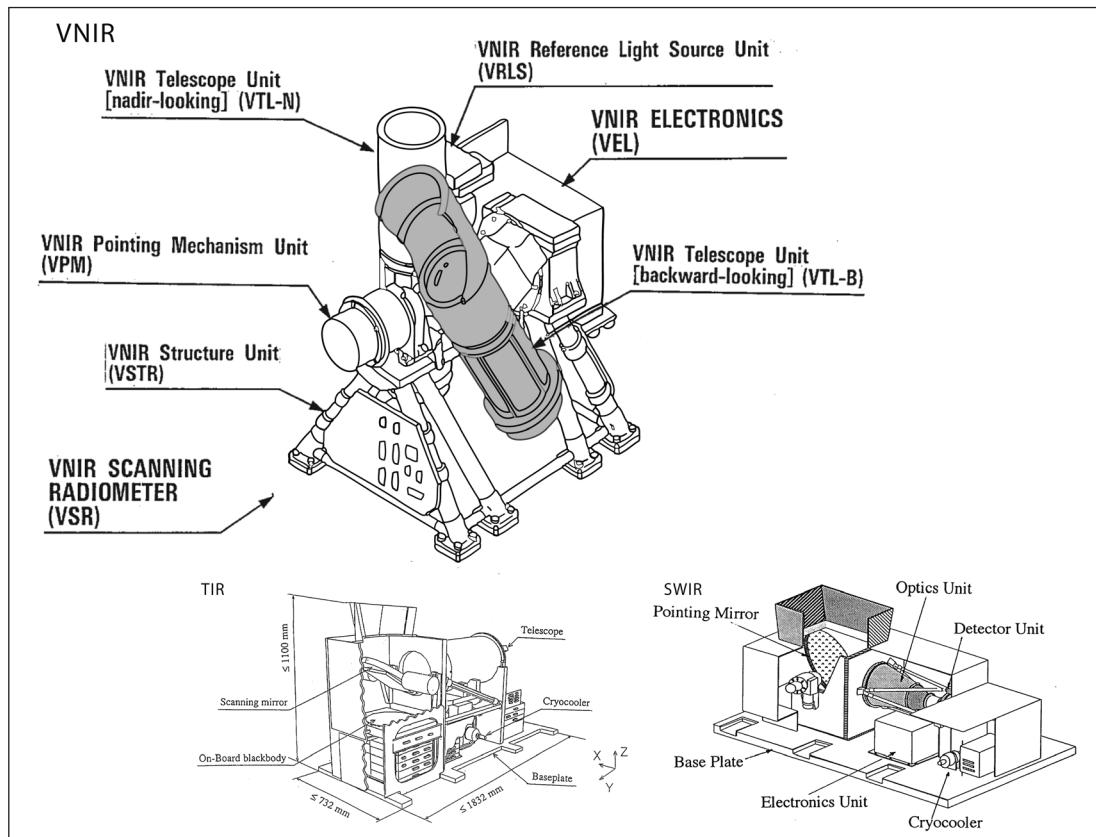


Abb. 4-6: Schematische Darstellung der drei Aufnahmesysteme des ASTER-Systems (verändert nach ASTER user GUIDE 2007). Gut zu erkennen ist die zweite Kamera des VNIR-Systems (im Schema markiert).

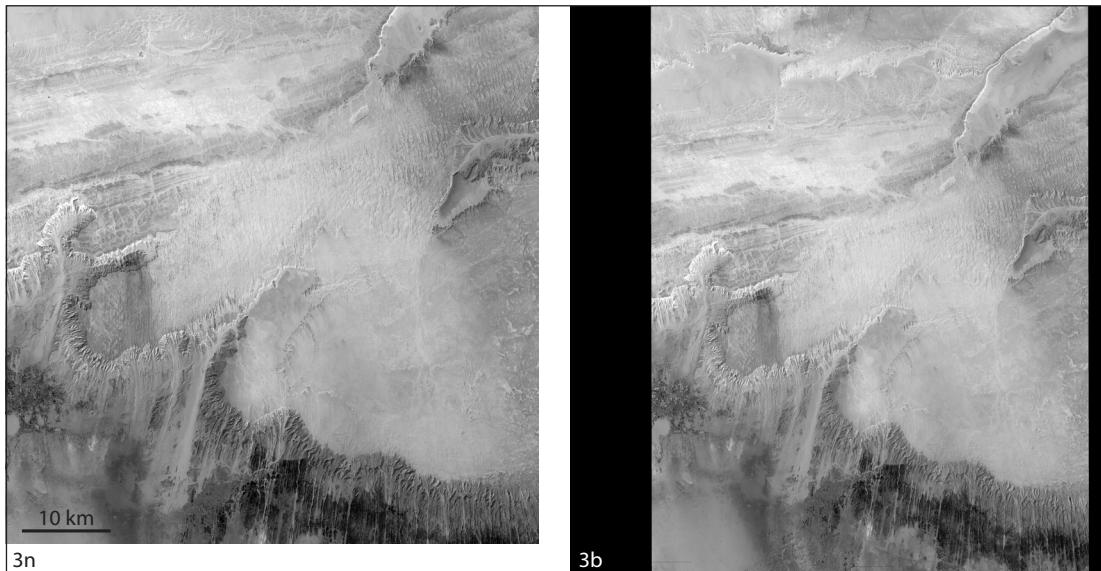


Abb. 4-7: Rohbilder bei der Erzeugung von ASTER-Höhenmodellen. (eigener Entwurf)

- Kanal 3n: Nadirkanal einer Aufnahme.
- Kanal 3b: „Backward“-Kanal einer Aufnahme; Ausschnitt des 3n-Kanals ist komplett enthalten, die Aufnahme wird jedoch mit einem Winkel von $27,9^\circ$ einige Sekunden später aufgenommen und umfasst durch den Winkel einen größeren Aufnahmebereich.

durch Stereopaare geringer zeitlicher Abfolge, Höhenmodelle zu erzeugen, einen hohen wissenschaftlichen Nutzen in vielfältigen Fragestellungen. So sind die ehrgeizigen Ziele, in welchen Bereichen die ASTER-Daten wissenschaftliche Fragestellung beantworten können, sicher nicht zu hoch gesteckt.

WELCH ET AL. (1998) beschreiben die potentielle Vorhersage einer vollständigen Abbildung der Landbedeckung durch wolkenfreie Szenen innerhalb von sechs Jahren. Diese Vorhersage ist bis heute bei weitem nicht eingetroffen, da immer noch Bereiche (auch in den in dieser Arbeit vorgestellten ariden Gebieten) existieren, die nicht oder nur mit einer starken Wolkenbedeckung aufgenommen wurden. Darüber hinaus wird ein weltweites Höhenmodell aus ASTER-Daten in Aussicht gestellt, das innerhalb der angestrebten Sechs-Jahres-Mission fertig gestellt werden sollte. Auch dieses Ziel ist bis heute nicht erreicht. Damit erscheint es sinnvoll, trotz des Vorhandenseins von nahezu weltweit abdeckenden SRTM-Höhendaten (mit den in Kap. 4.2.2.4 vorgestellten Problemen) Höhenmodelle hoher Auflösung für verschiedene Maßstabsbereiche in Forschungsprojekten als Grundlage für zu beantwortende Fragestellungen selbst abzuleiten und nicht auf das in Aussicht gestellte Modell zu warten.

4.2.2.2 ASTER Höhenmodell

Eine Überprüfung der bisher veröffentlichten Studien, die ASTER-Daten nutzen, zeigt, dass überwiegend die spektrale Ausstattung des Sensors genutzt wird. Die Tabellen 4-5 bis 4-7 geben einen Überblick über typische Anwendungen aus der Literatur zu allgemeinen Themen, Nutzen der Spektraldata und dem Einsatz von Höheninformationen aus ASTER-Daten. Das Verhältnis zwischen der spektralen Nutzung und der Nutzung digitaler Geländemodelle aus ASTER-Daten ist dabei in etwa gleich. Anzumerken ist jedoch, dass die Autorenvielfalt bei den Spektraluntersuchungen höher ist. Das ist sicher damit zu erklären, dass bestehende Forschungsergebnisse (mit Landsat-Daten, z.B. CAMPBELL 1996) auf ASTER-Spektraldata gut anwendbar sind und dass allein die Erzeugung eines ASTER-Höhenmodells bereits spezielle Computer-Software und Kenntnisse erfordern, die nicht soweit verbreitet war oder ist. Daneben existieren für einige Regionen der Erde bereits höheraufgelöste Höhenmodelle, die für Forschung und Lehre zur Verfügung stehen.

Die Erzeugung von Höhenmodellen aus Stereodata, besonders im so genannten ‚along-track‘ Verfahren (Erzeugung der Stereobilder während desgleichen Überflugs), wird noch nicht von vielen Satelliten angeboten. Bei diesem System sind gerade für Regionen ohne Bodenkontrolle die Lagedaten der Satellitenbilder von besonderer Wichtigkeit, da eine Korrektur der Daten nur schwer erfolgen kann und für große Gebiete extrem aufwändig ist. Aus diesem Grund ist die Lagekontrolle des TERRA-Satelliten (s.o.) besonders genau (< 50 m), sodass relative Höhendaten auch ohne Bodenkontrolle sehr präzise ableitbar sind (FUJISADA ET AL. 2005). Das so genannte ‚across track‘ Verfahren, bei dem Bilder verschiedener Umläufe genutzt werden, erzeugt das Problem, dass sich die Atmosphärensituation zwischen den beiden Bildern verändert hat und eine aufwändige Korrektur der Daten durchgeführt werden muss, um eine optimale Qualität zu erhalten.

Tab. 4-5: Ausgewählte Grundlagenliteratur zu ASTER-Daten. (eigene Erhebung)

Veröffentlichung	Thema
TOKUNAGA & HARA (1996)	Fehlervorhersage
FUJISADA (1998)	Überblick über den Aufbau der Level 1A-Daten
WELCH ET AL. (1998)	Möglichkeiten und Erwartungen
YAMAGUCHI ET AL. (1998)	Grundlagen, Vorstellung der Instrumente
ARAI (1999, 2001), ARAI & TOMOOKA (2005)	Radiometrische Möglichkeiten und Kalibrierungstechnik
ABRAMS (2000)	Erste Einschätzung des zu erwartenden Fehlers
TAKASHIMA ET AL. (2001)	Atmosphärenkorrektur
SELBY (2003)	Erzeugung eines DGMs
IWASAKI & FUJISADA (2005)	Lagegenauigkeit
IWASAKI & OYAMA (2005)	Korrektur von Spektraldataen
IWASAKI & TONOOKA (2005)	„Crosstalk“- Korrektur
SAKUMA ET AL. (2005)	Datenkalibrierung im Satelliten

Tab. 4-6: Ausgewählte Literaturangaben zu Felduntersuchungen mit Spektralkanälen der ASTER-Daten. (eigene Erhebung)

Veröffentlichung	Thema
NINOMIYA (2002), NINOMIYA ET AL. (2005)	Geologische Kartierung (Quarz, Karbonate, Minerale) mit Spektralkanälen (China, Australien)
CAPOLINI ET AL. (2003)	Nutzung verschiedener Satellitensensoren zur Kartierung von Korallenriffen im Süd-Pazifik
YAMAGUCHI & NAITO (2003)	Spektraldataenbank zur Nutzung der Spektralkanäle von ASTER (USA)
ROWAN & MARS (2003), ROWAN ET AL. (2005)	Geologische Kartierung (Californien, USA; Mordor, Australien, NT)
ALMEIDA-FILHO ET AL. (2005)	Untersuchung eines Kraters in Brasilien mittels ASTER Spektraldataen und SRTM-3 Geländemodell
GOMEZ (2005)	Geologische Kartierung mittels Spektralkanälen (Namibia)
HUBBARD & CROWLEY (2005)	Geologische Kartierung mit ASTER- und Hyperion-Daten (Chile/Bolivien)
PIERI & ABRAMS (2005)	Vulkanuntersuchung mit Thermalkanälen (Russland)
WALDHOFF (2006)	Klassifikation der Geologie mittels Spektralkanälen (Ägypten)

Tab. 4-7: Ausgewählte Literaturangaben zum Einsatz von ASTER-Höhendaten in Felduntersuchungen. (eigene Erhebung)

Veröffentlichung	Bemerkung
TOUTIN & CHENG (2001, 2002)	DEM-Erzeugung und Fehlermessung (Utah, USA)
BOLCH & KAMP (2003)	Messung der Genauigkeit mittels Vergleich mit topographischer Karte 1:50.000 im Hochgebirge von Chile/Bolivien
HIRANO ET AL. (2003)	Fehlerangaben für ASTER-DEM (Japan, Bolivien/Chile, USA)
KAMP ET AL. (2003, 2005)	Geomorphometrische Analysen im Hochgebirge (Bolivien/Chile)
BUBENZER & BOLTEN (2003)	Erste Untersuchungen zum Einsatz von ASTER-Daten
FU ET AL. (2004)	Verwerfungsmessung nach dem Erbeben in Bam (Iran)
STEVENS ET AL. (2004)	Vulkankartierung (Neuseeland)
LEVIN ET AL. (2004)	Dünenkartierung (ASTER als Vergleichs-Modell) (Israel)
CUARTERO ET AL. (2004, 2005)	Bestimmung der Genauigkeit der ASTER-Höhendaten (Südspanien)
ECKERT ET AL. (2005)	Fehlermessung in den Alpen (Schweiz)
FUJISADA ET AL. (2005)	Fehlerangaben für ASTER-DEM (Japan, USA)
KÄÄB ET AL. (2002) KÄÄB (2005)	Gletscherfluss in den Alpen; Vergleich mit Landsat-Bildern und Luftbildphotogrammetrie (Schweiz)
BOLTEN ET AL. (2006)	ASTER-Höhendaten als Grundlage zur Rekonstruktion von Nutzungspotential
BOLTEN & BUBENZER (2006)	Geomorphologische und Geoarchäologische Untersuchungen in ariden Gebieten (Ägypten)
BUBENZER & BOLTEN (in press a)	Morphometrische Untersuchungen von Draa (Ägypten, Namibia)

4.2.2.3 Erzeugung eines ASTER Höhenmodells aus Rohdaten mit PCI Orthoengine 9

Für die Erzeugung von Höhenmodellen aus ASTER-Daten existieren mehrere Möglichkeiten. FUJISADA ET AL. (2005) stellt zwei Methoden vor:

Zum einen die am Earth Remote Sensing Data Analysis Center in Japan durch die japanische Bodenkontrollgruppe der ASTER Mission entwickelte Methode. Dabei handelt es sich um ein eigenes spezielles Softwaresystem, dass eigens für die Erstellung relativer Geländemodelle ohne Bodenkontrolle aus ASTER-Daten geschrieben

wurde. Zum anderen die durch die NASA am ‚Land Processes Distributed Active Archive Center‘ (LP DAAC) des ‚U.S. Geological Surveys‘ (USGS) genutzte Methode. In diesem Fall ist eine kommerzielle Software für die Zwecke der Höhenmodellerstellung abgewandelt worden (FUJISADA ET AL. 2005). In Zusammenarbeit mit der Softwarefirma PCI Geomatics (Kanada) wurde die Software Orthoengine so abgeändert, dass ASTER-Rohdaten verwendet werden können (ENGELHARDT 2002, TOUTIN & CHENG 2001). Damit ist es möglich, relative und absolute Geländemodelle zu erstellen. Neben diesen beiden Methoden ermöglichen in den Folgejahren nach 2000 auch andere Fernerkundungsprogramme die halbautomatische Erzeugung von Geländemodellen aus ASTER-Daten (z.B. Erdas Imagine, ENVI, usw.). Durch den Entwicklungsvorsprung und die direkte Zusammenarbeit von PCI Geomatics mit den Verantwortlichen für die Rohdaten ist die Qualität und Genauigkeit der Erzeugung mit Orthoengine sehr gut und wird somit in der vorliegenden Arbeit genutzt. CUARTERO ET AL. (2005) vergleichen die Erzeugung eines ASTER-Höhenmodells mit anderen Softwarepaketen (z.B. Erdas Imagine Othrobase Pro) und zeigen, dass Orthoengine die besten Resultate für die Erzeugung eines Raster-Höhenmodells liefert.

Im Folgenden werden die entscheidenden Hauptschritte der Ableitungen mit PCI Geomatics Orthoengine 9 vorgestellt. Die technischen Grundlagen der Verfahren werden detailliert in KRAUS (2004) erläutert.

Einlesen eines ASTER-Datensatzes

Aster-Daten werden in einem hierarchischen Datenformat (HDF), das vom ‚National Center for Supercomputing Applications‘ (NCSA 2007, HDF 2007) entwickelt wurde, für den Endnutzer in verschiedenen Aufbereitungsstufen von der NASA am ‚Earth Observing System Data Gateway‘ (EOS 2007) angeboten. Aufgrund des Nachweises des Einsatzes der ASTER-Daten für Forschung und Lehre konnten im Teilprojekt E1 des SFB 389 die Daten kostenfrei für das gesamte Untersuchungsgebiet des SFB 389 genutzt werden. Seit dem 25. Januar 2006 kostet eine ASTER-Szene für den kommerziellen Einsatz 80 US\$, vorher betrug der Preis 50 US\$ je Szene (ASTER pricing 2007). Dies ist im Vergleich zu anderen Fernerkundungsdaten ein günstiger Preis.

In einem Datensatz einer ASTER-Szene befinden sich alle 14 Kanäle, das ‚backward‘-Bild und alle weiteren Informationen (z.B. Bahnparameter) komprimiert in einer

Datei (s. Abb. 4-8). Dieser Datensatz wird in einer bestimmten Aufbereitungsstufe als *Level 1A*-Datensatz bezeichnet und ist direkt aus den Level 0-Rohdaten abgeleitet.

Mittels des Import-Moduls von Orthoengine (Abb. 4-9) lassen sich einzelne Kanäle oder Kanalgruppen eines Bildes importieren und entweder als Einzeldatei oder Mehrkanaldatei (bspw. eines RGB-Farbbildes mit 15 m Auflösung bestehend aus den Kanälen 1, 2 und 3n) entnehmen.

Für die Erzeugung eines digitalen Höhenmodells werden die Kanäle 3n und 3b eines Rohdatensatzes genutzt. Als Datenquelle werden die oben angesprochenen L1A-

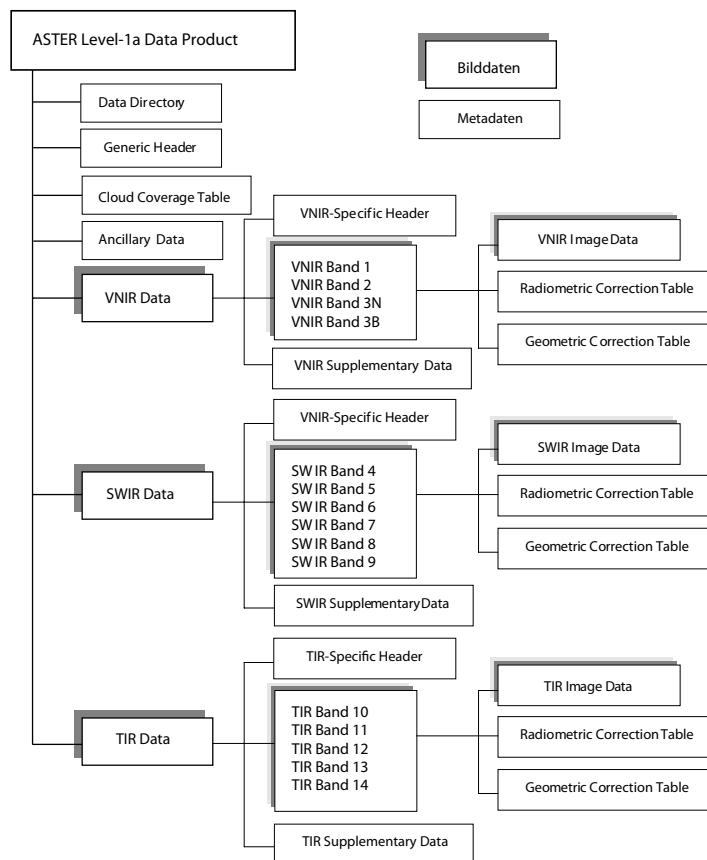


Abb. 4-8: Level 1A-Datenaufbau einer ASTER-Szene. Der Datensatz enthält neben den einzelnen Kanälen in den drei Gruppen auch Metadaten. (verändert nach ASTER User Guide 2007)

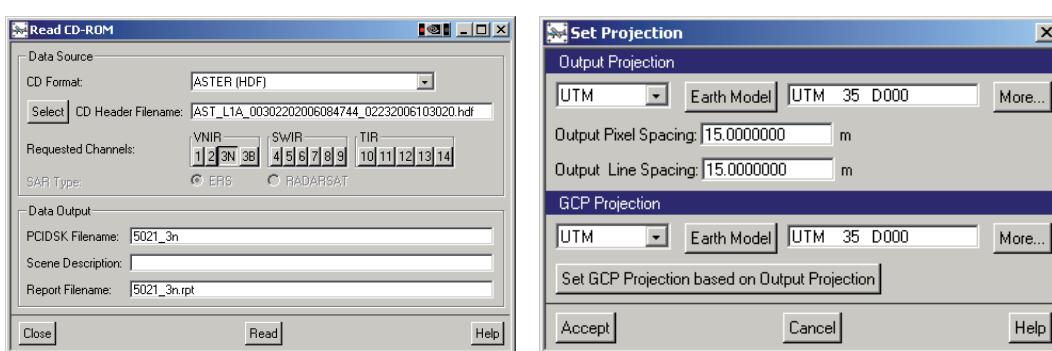


Abb. 4-9: Entnehmen einzelner Kanäle oder Kanalgruppen aus einer ASTER L1A-Datei und die Definition einer Eingabe- und Ausgabeprojektion in PCI Orthoengine. (PCI Orthoengine 9.2.)

Rohdaten (FUJISADA 1998) einer ASTER-Szene genutzt. In der Literatur finden sich auch Hinweise zur Nutzung der Level 1B-Daten zur Erstellung eines Geländemodells. Diese Daten sind stärker korrigiert und bereits orthorektifiziert. In der täglichen Arbeit mit den Daten hat sich herausgestellt, dass sich mit den L1A-Daten wesentlich bessere Ergebnisse erzeugen lassen und zusätzlich, durch den Rohdatencharakter der Daten, weit mehr Möglichkeiten im sonstigen Einsatz der Daten bestehen (z.B. eigene Farbanpassungen).

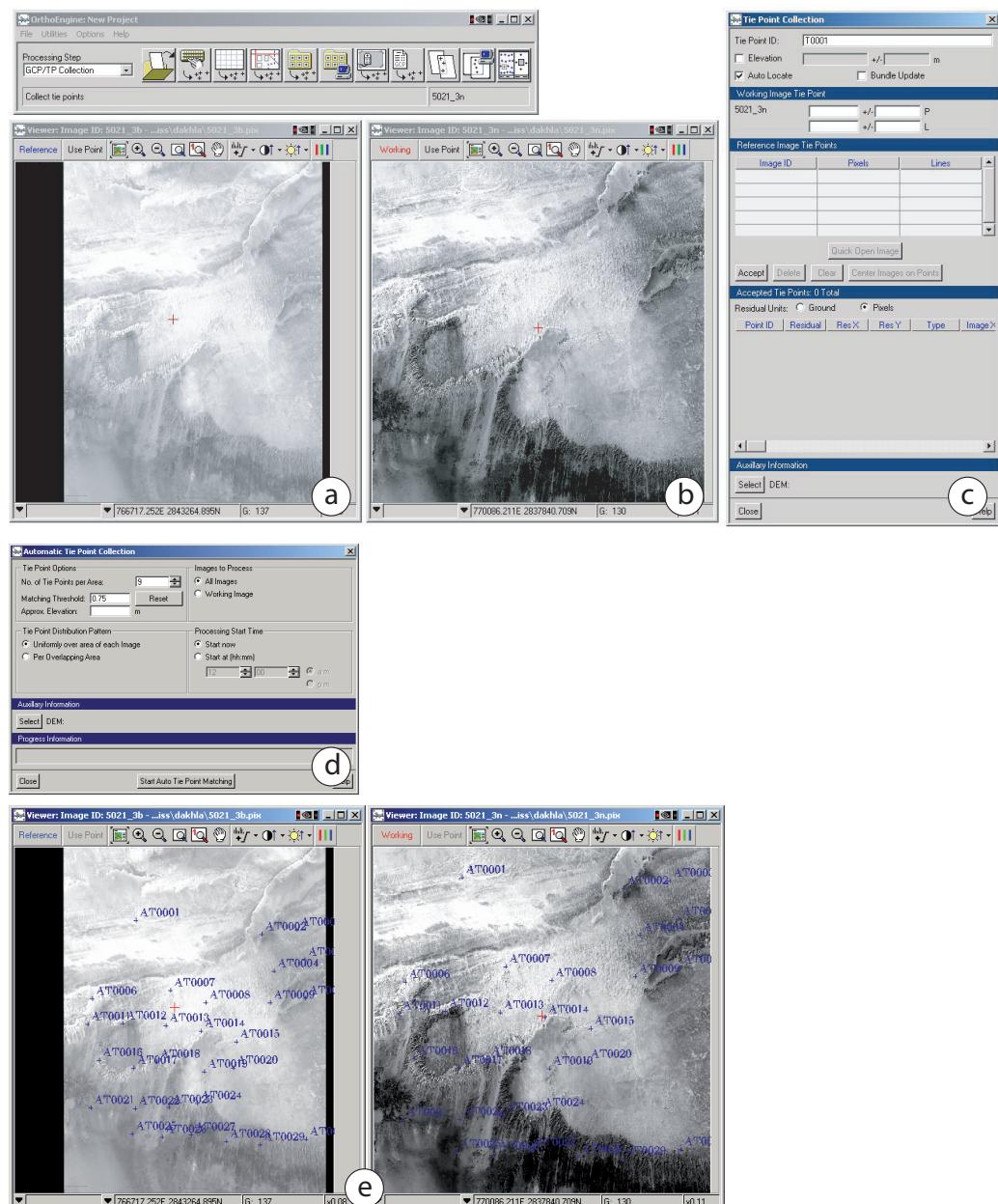


Abb. 4-10: Prozess der Erfassung von Ankerpunkten. Für die Bilder (a, b) werden mittels manueller (c) oder halbautomatischer Erfassung (d) einzelne Ankerpunkte bestimmt (e), um die gegenseitige Lageausrichtung der Bilder unter ein Pixel genau festzulegen. (PCI Orthoengine 9.2)

Ein weiterer wichtiger Vorbereitungsschritt ist die gegenseitige Ausrichtung der beiden Bilder 3n und 3b, die nicht exakt denselben Bildausschnitt abdecken (vgl. Abb. 4-7). Zur Ausrichtung der Bilder allein auf der Basis der Bahndaten des Satelliten reicht die Genauigkeit bei weitem nicht aus. Aus diesem Grund müssen ‚tie‘-(Anker-)Punkte erfasst werden, die jeweils möglichst genau dieselbe Region in beiden Bildern erfassen. Die Anzahl nötiger Ankerpunkte liegt dabei bei mindestens neun, muss aber je nach Szene deutlich erhöht werden, gerade dann, wenn in der abgedeckten Region eine starke Reliefenergie vorliegt. In PCI Orthoengine stehen zwei Methoden zur Erfassung von Ankerpunkten zur Verfügung. Abbildung 4-10 zeigt beide Module: Zum einen die manuelle Erfassung (Abb. 4-10c), bei der für beide Bilder gleiche Pixel manuell ausgewählt werden und zum anderen die halbautomatische Erfassung (Abb. 4-10d) bei der die Software selbst versucht – mit einigen Randbedingungen – eine Anzahl von Ankerpunkten festzulegen. Abhängig von der Vielfalt der Strukturen im Bild gelingt es nicht automatisch, genügend Ankerpunkte zu erfassen, oder die Erfassung ist fehlerhaft, sodass auf eine meist schwierige und langwierige manuelle Erfassung zurückgegriffen werden muss. Der Lagefehler zwischen den beiden Bildern liegt bei erfolgreicher Erstellung unter einem Pixel.

Erzeugung von Epipolarbildern

Nachdem beide Aufnahmebilder korrekt ausgerichtet sind, können in einem weiteren Schritt Epipolarbilder erzeugt werden, die als Quelle für die Erstellung des Höhenmodells dienen. Die Epipolarbilder sind vergleichbar mit Stereobildpaaren bei der analogen Stereobildauswertung mit Hilfe eines Planicompgerätes (vgl. KRAUSS 2004). Der Dialog (Abb. 4-11) in PCI Orthoengine erzeugt die in Abb. 4-12 dargestellten Epipolarbilder.

Erzeugung des ASTER-Höhenmodells

Die Epipolarbilder (Abb. 4-12) können in einem weiteren Schritt (Abb. 4-13) in ein Höhenmodell umgewandelt werden. Dazu werden für alle Pixel die Parallaxen (also die Winkel) berechnet und verglichen. Abschließend wird das Modell mittels der Bahnpараметer des Satelliten und eines niedrig aufgelösten Höhenmodells geeicht und neu referenziert.

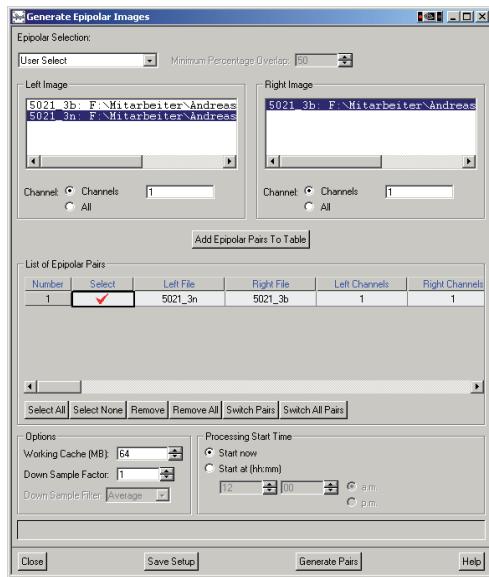


Abb. 4-11: Dialog in PCI-Orthoengine zur Erzeugung von Epipolarbildern. (PCI Orthoengine 9.2)

Das Ergebnis (Abb. 4-14) wird dann als ein Graustufen-Bild, das zusätzlich die Höheninformation für jedes Pixel enthält, ausgegeben und kann nach Konvertierung in anderen Computer-Programmen eingesetzt werden. Die Erzeugung einer Szene dauert bei unproblematischem Verlauf (Bewölkungsfreiheit, gute Lagekontrolle, automatische Ankerpunktterfassung) mindestens 30 Minuten, wobei die Berechnung durch den PC die meiste Zeit in Anspruch nimmt. Bei Szenen, die problembehaftet sind, kann der Prozess deutlich länger dauern oder das Ergebnis aufgrund der ungenauen Lageerfassung oder der Einstellung nicht angepasster Parameter leiden.

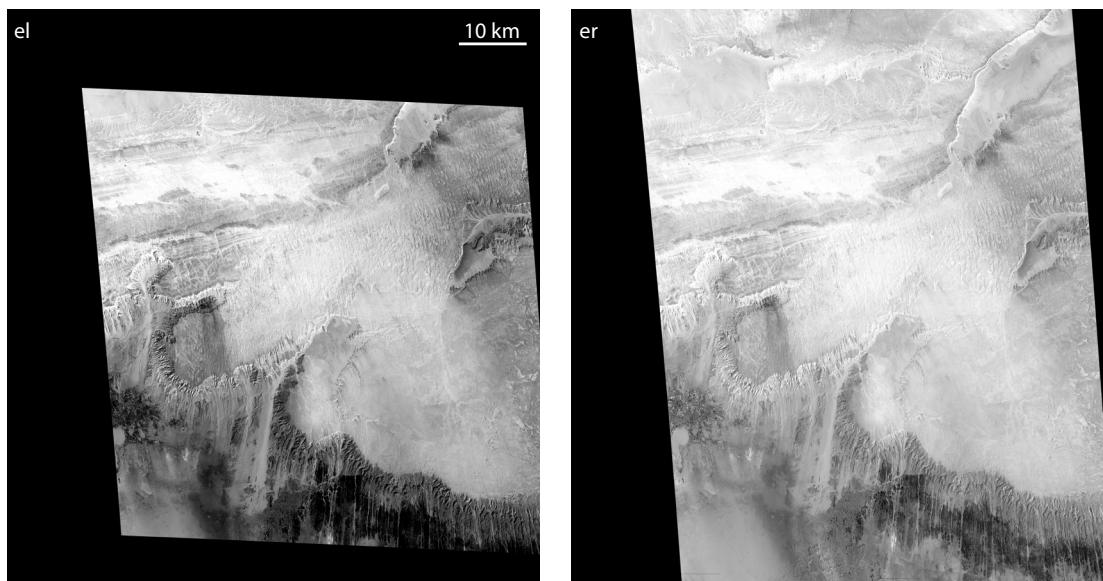


Abb. 4-12: Epipolarbilder nach der Erzeugung in PCI-Orthoengine. (eigener Entwurf)

- *el*: linkes Epipolarbild
- *er*: rechtes Epipolarbild

Ein Zusammenfassen mehrerer ASTER-Modelle zu einem größeren Höhenmodell ist möglich, für viele Szenen jedoch mit einigen Schwierigkeiten verbunden. Eine Erstellung von bis zu fünf in Flugrichtung aufgenommenen Szenen ist softwarebasierend direkt möglich, da die Rohbilder des 3n- und 3b-Kanals vor der Verarbeitung zusammengefasst werden können. Die Qualität des Höhenmodells kann jedoch aufgrund von reduzierter Aufnahmefähigkeit einzelner Bilder sinken. Häufig müssen für die Erfassung größerer Regionen auch Szenen aus anderen Flugumläufen genutzt werden. In diesen Fällen müssen die Szenen einzeln hergestellt und nachträglich in einem

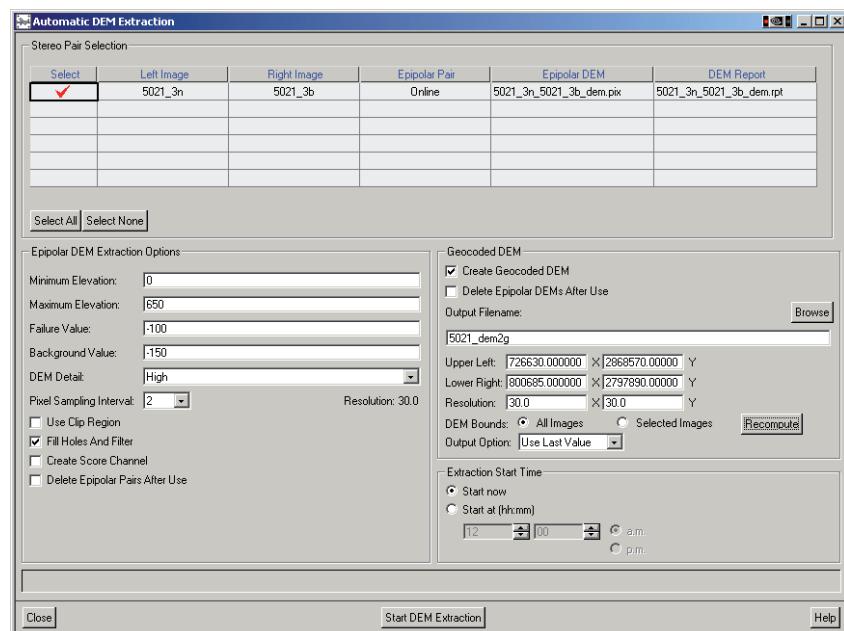


Abb. 4-13: Eingabemodul zur Erzeugung des abschließenden Höhenmodells aus Epipolarbildern mit PCI-Orthoengine. (PCI Orthoengine 9.2)



Abb. 4-14: Bild des erzeugten Höhenmodells. Die Graustufen geben die Höhen wieder (dunkel: tief, hellgrau: hoch, schwarz: Szenenrand). Die Bildkantenlänge entspricht 60 km. (eigener Entwurf)

Mosaik zusammengefasst werden. Aufgrund des relativen Charakters bzw. der groben Eichung der Höhendaten kann es hier zu einem Versatz der Szenen untereinander kommen und dies nicht nur in vertikaler Richtung, sondern auch in horizontaler Richtung. Aus diesem Grund zeigt die Erfahrung, dass eine Kombination aus mehr als 3x3 relativen ASTER-Szenen nur mit großen Problemen zu erzeugen ist.

Ein Erzeugen der Höhenmodelle mit äußerer Kontrolle über die Erfassung von ‚Ground Control Points‘ (GCP) ist möglich, jedoch sind im Untersuchungsgebiet keine Höhendaten vorhanden, die eine genügend hohe Genauigkeit aufweisen. Die mindestens neun Punktdaten müssten manuell bspw. mittels differentiellem GPS gleichmäßig für die Fläche einer Szene erfasst werden.

4.2.2.4 Daten der ‚Shuttle Radar Topography Mission‘ (SRTM)

Die ‚Shuttle Radar Topography Mission‘ (SRTM) hat das Relief der Erde im Bereich zwischen 60° N und 56° S aufgenommen (BAMLER 1999, SCHMULLIUS ET AL. 2000, WERNER 2001, RABUS ET AL. 2003). Das Aufnahmegerät, das im Jahre 2000 mit dem ‚Space Shuttle‘ Endeavour in eine Umlaufbahn gebracht wurde, besteht aus zwei Messanlagen, von denen eine am Ende eines Mastes befestigt war (Abb. 4-15).

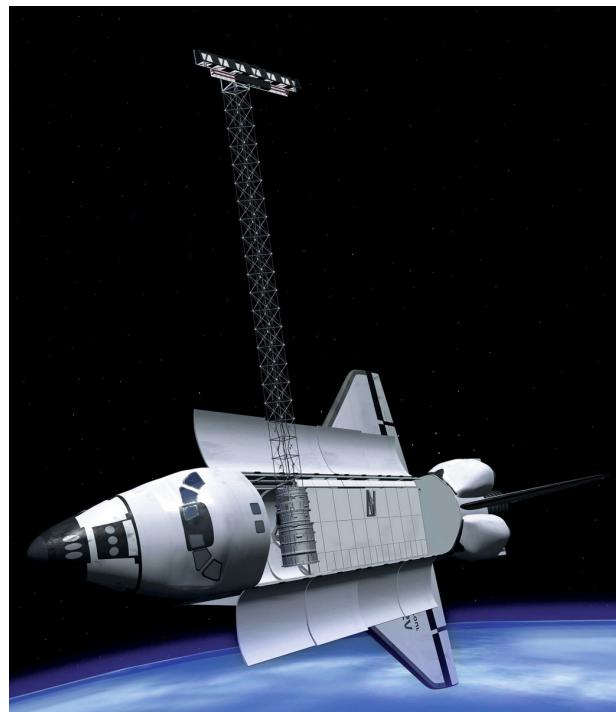


Abb. 4-15: Montage des Messaufbaus bestehend aus dem Shuttle und einem 20 m langen Mast mit weiteren Messanlagen (DLR 2007).

Die Mission bestand aus zwei getrennten Systemen, die sich in dem genutzten Wellenlängenbereich unterschieden. Die vom *Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (DLR) und dem *Agenzia Spaziale Italiana* (ASI) erhobenen SRTM-X Daten (Wellenlänge von 3,1 cm) sind jedoch nicht kostenfrei erhältlich und haben nur eine lückenhafte – in Streifen von 50 km Breite – Abdeckung (s. Abb. 4-16).

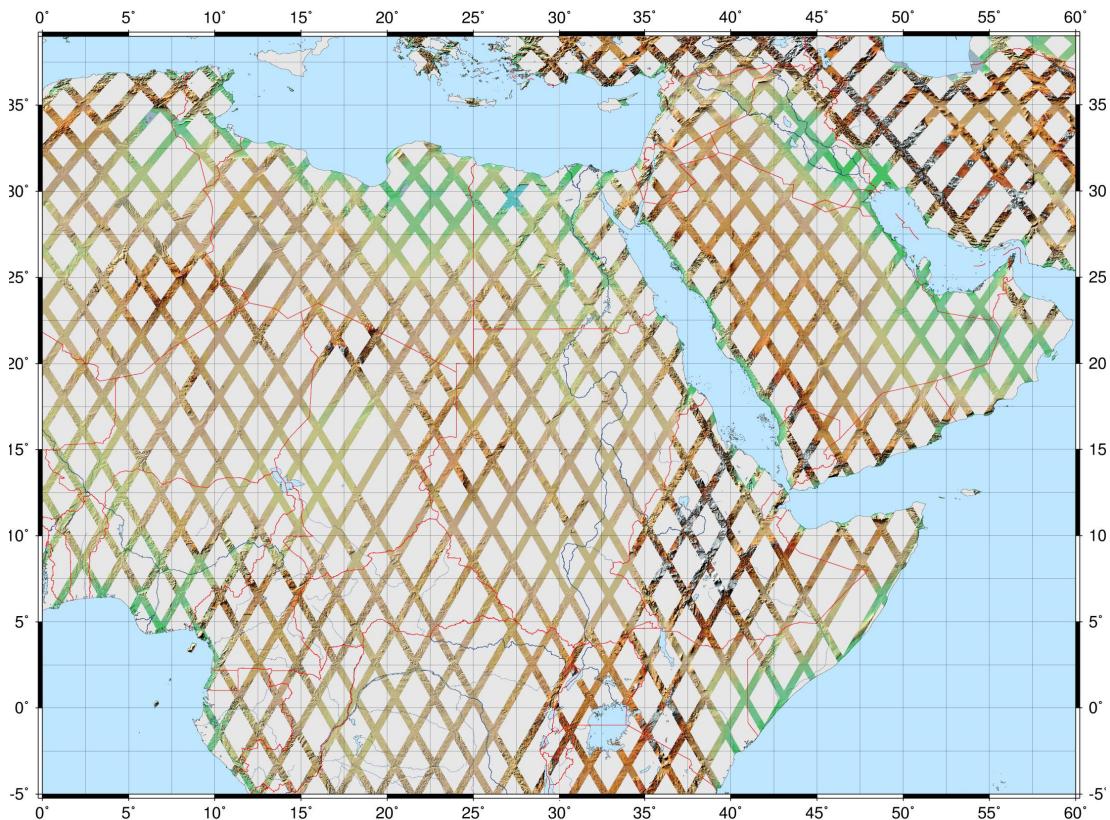


Abb. 4-16: Die streifenartige Abdeckung der SRTM X-Band Daten für Teilbereiche von Afrika und den Nahen Osten. (DLR 2005, verändert)

Durch die Kombination zweier Aufnahmegeräte, die in einem bekannten Winkel zueinander stehen ist auch hier die Erzeugung von Parallaxenbildern – ähnlich wie bei ASTER-Daten – möglich, die genutzt werden können, um ein Höhenmodell zu erstellen (LILLESAND ET AL. 2004). Auf die Vor- und Nachteile der Nutzung aktiver Sensoren wurde bereits in Kapitel 4.2.1.2 eingegangen.

Der Nachteil der geringeren Auflösung gegenüber passiven Systemen wird zunehmend ausgeglichen. Beim TERRASAR-X Satelliten, der 2007 gestartet wurde, werden mit Radartechnik bereits Auflösungen von flächendeckenden 16 m erreicht und kleinräumig sogar bis zu 1 m (STANGL ET AL. 2006).

Das zweite SRTM-System hat Daten im langwelligeren C-Band (Wellenlänge = 5,1 cm) aufgenommen und wurde von der NASA und dem US-amerikanischen Militär

betrieben. Das daraus entstandene SRTM-3-Höhenmodell, das aus dem militärischen Datensatz SRTM-1 (eine Bogensekunde Auflösung ~30 m) abgeleitet ist, hat eine Auflösung von drei Bogensekunden (~90 m). Leider ist das Originalmodell (SRTM-1) nur für den Raum der USA verfügbar, wird jedoch nicht – auch nicht kostenpflichtig – für die restliche Abdeckung zur Verfügung gestellt. Hier haben sich die Vorhersagen aus dem Jahre 1996 leider bestätigt (MEADE & SANDWELL 1996).

Aufgrund von Problemen bei der Erhebung der SRTM-Daten – Vibrationen des Antennenmastes – und der unglaublich hohen Datenmenge haben die daraus abgeleiteten Höhenmodelle relativ lange auf sich warten lassen (FARR ET AL. 2007). Das Modell für Afrika ist beispielsweise erst im April 2004 verfügbar gewesen.

Die SRTM-3-Daten werden u.a. über das Global Land Cover Facility (GLCF 2007) online zum ‚Download‘ angeboten. Folgende Qualitätseinschränkungen werden im Zusammenhang mit den SRTM-3-Daten bekannt gemacht:

- Die Daten sind nicht bearbeitet und enthalten Regionen ohne Daten („no-data“), sowie Regionen mit anormalen Höhen (Spitzen und Senken) („anomalous values“).
- Die Küstenlinien sind nicht bearbeitet und die Wasserflächen sind nicht absolut flach.
- Die Daten sind nicht evaluiert und ihre Genauigkeit ist nicht klassifiziert.
- Die Höhen sind angegeben in Bezug auf den WGS 84-Ellipsoid.
- Die Daten entsprechen keinem Fehlerstandard und es bestehen Unterschiede zum bisherigen Standarddatensatz ‚Digital Terrain Elevation Data standard‘ (DTED Level 2) der USA.
- Die vorhandenen Kontinentschnitte sind nicht die abschließenden Mosaikkacheln und können noch nicht abgedeckte Regionen enthalten.

(Angaben übersetzt nach ‚Jet Propulsion Laboratory‘ (JPL 2007b)).

Aufgrund von Qualitätseinschränkungen werden von Drittanbietern weitere Versionen der SRTM-3-Daten angeboten, die die angesprochenen Fehler verbessern bzw. beseitigen.

Für die Western Desert Ägyptens (s. Kap. 3) ist vor allem der erste Fehler von Bedeutung. In den sandbedeckten Gebieten (Sandflächen, Draa und Dünen) treten ‚no-data‘-Regionen auf, die zum Teil nur einzelne Pixel, aber auch größere zusammenhängende Bereiche umfassen. Ein Muster hinsichtlich topographischer Positionen oder Bedeckungstyp liegt hier jedoch nicht vor.

Abbildung 4-17 zeigt einen Ausschnitt der Großen Sandsee an der ägyptisch libyschen Grenze, in der die ‚no-data‘-Bereiche der originalen SRTM-Daten deutlich zu erkennen sind.

Der SRTM-3-Datensatz, der von der ‚Consultative Group for International Agriculture Research‘ (CIGAR-CSI 2007) angeboten wird, füllt diese Bereiche einerseits, indem einzelne Pixel mit den Höheninformationen aus den umgebenden Höhenpixeln interpoliert werden und andererseits, indem Daten aus dem SRTM-30-Datensatz eingesetzt werden. Beim SRTM-30-Datensatz handelt es sich um eine verbesserte Version des GTOPO 30-Datensatzes (GESCH & LARSON 1996, vgl. Tab. 4-2), der zum einen eine Interpolation des SRTM-3-Datensatzes auf 30 Bogensekunden (~1000 m Pixelweite) darstellt und dadurch kleinere Datenlücken füllt und zum anderen GTOPO 30-Daten für alle weiteren Datenlücken nutzt. Abbildung 4-18 (zeigt denselben Ausschnitt wie Abbildung 4-17) verdeutlicht das Ergebnis dieser Datenkorrektur und zeigt, dass das Ergebnis nicht befriedigend ist. Die Datenlücken wurden mit einem groben Modell gefüllt und zeigen keine Anzeichen für Longitudinaldünen. Die genutzten Daten haben sich vielmehr insgesamt aus dem umliegenden Gelände heraus.

Die für die Region der Großen Sandsee bestehenden GTOPO 30-Daten entstammen nur sehr schlecht aufgelösten und mit großen Fehlern behafteten Daten, sodass hier keine Großformen (Draa und Dünen) zu erkennen sind. Für eine Analyse der Daten sind diese ungeeignet. In Kapitel 5.5.3 wird eine alternative Möglichkeit vorgestellt und angewendet, die ‚no-data‘-Regionen der Western Desert zu korrigieren und damit die Nutzbarkeit der Daten wesentlich zu erhöhen.

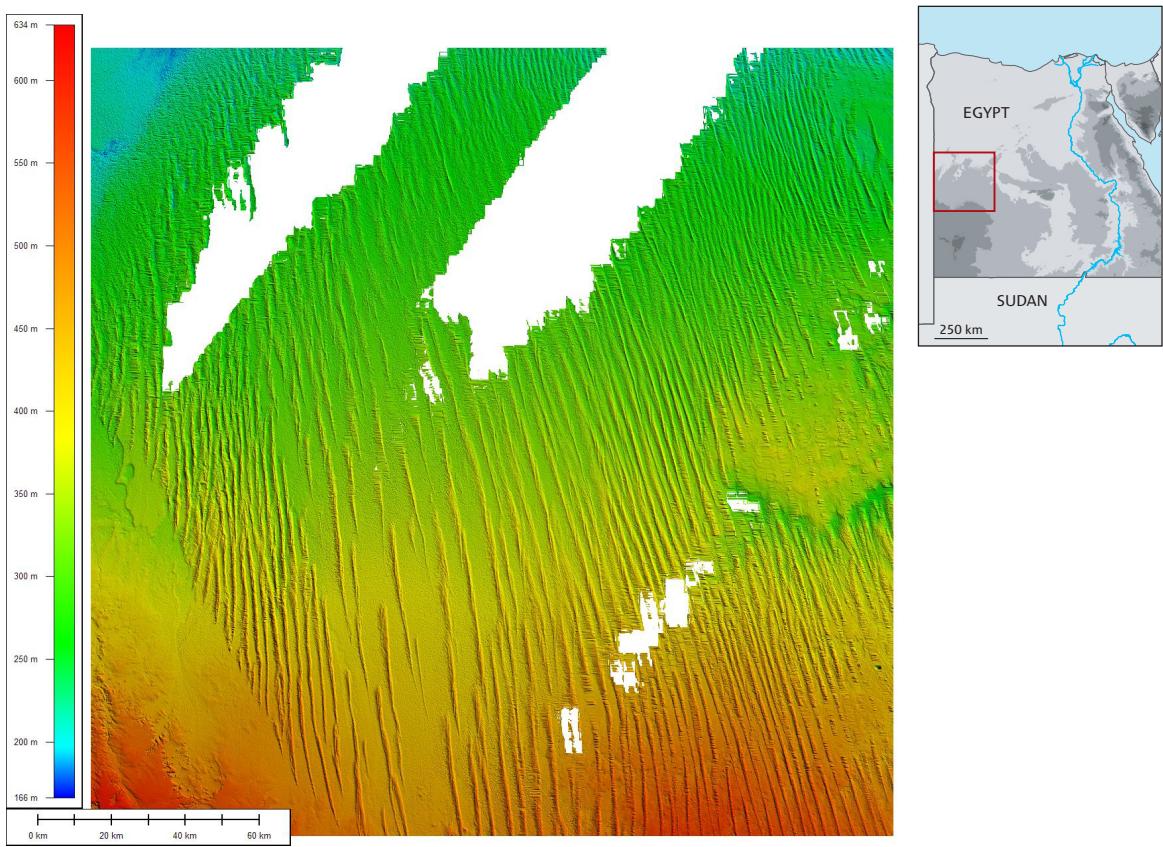


Abb. 4-17: SRTM-Rohdaten aus der Großen Sandsee an der ägyptisch-libyschen Grenze. Das Gebiet ist in der Beikarte verortet. Deutlich sind die Longitudinaldünen und in weiß die „no-data“-Bereiche zu erkennen, die in diagonalen breiten Streifen von SW nach NE ziehen. (eigener Entwurf)

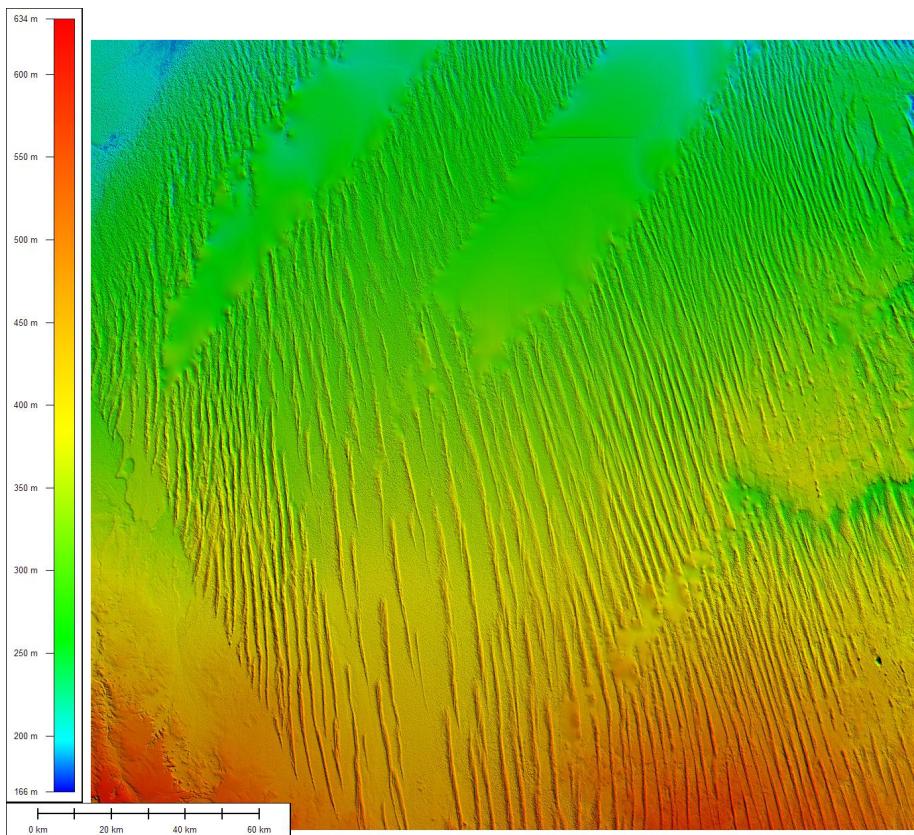


Abb. 4-18: Korrigierte SRTM-Daten derselben Region dargestellt in Abbildung 4-17. Deutlich zu erkennen sind die gefüllten Bereiche und die geringe Qualität der Füllung. (eigener Entwurf)

4.3 Geomorphometrie

Die Geomorphometrie ist definiert als die „numerische Beschreibung topographischer Formen“ (SCHMIDT & DIKAU 1999) und kann als Werkzeug der Reliefanalyse bezeichnet werden. Die Reliefanalyse ist das Studium der Elemente, die die Oberflächenform, die Reliefbasis, die Reliefgeschichte (Morphogenese) und die Topologie (die räumliche Anordnung oder Komposition) beeinflussen (SCHMIDT & DIKAU, 1999). PENCK (1894) und PASARGE (1912) legten mit ihren Arbeiten die Grundlagen für verschiedene allgemeine Klassifikationen, die als Ziel hatten „eine hierarchische Strukturierung des Georeliefs zu erreichen“ (DIKAU 1996). Diese Konzepte sind dann von KUGLER (1974) dahingehend weiterentwickelt worden, dass die Geomorphographie eine Analysemethode darstellt, die zu einer Verbesserung der Extraktion komplexer Formengenerationen führt (DIKAU 1996). Damit lassen sich Reliefeinheiten nach ihren Ordnungsstufen zerlegen, die ihre Grenzen an den numerisch stark wechselnden geomorphometrischen Parametern haben.

Die Geomorphometrie steht im Schnittfeld zwischen den Computerwissenschaften, den Erdwissenschaften, der Mathematik und Statistik sowie den Ingenieurwissenschaften (PIKE 1995). Dabei leitet sich der Begriff von „Geo“ = „Erde“, „-morpho“ = „Form“ und „-metrie“ = Messen ab und kann daher als Maßangabe für Formen der Erdoberfläche bezeichnet werden (SOHLBACH 1978). Die Entwicklung der Geomorphometrie steht in Deutschland unter anderen Vorzeichen als in den USA. Dort ist ausgehend von der angewandten Beschreibung der Landschaft und der Forschung der Landschaftszerstörung (bspw. der „dust bowl“-Problematik, z.B. in GEBHARDT ET AL. 2007) die digitale analytische Erforschung der Landschaftsformen seit den 1960er Jahren stärker vorangeschritten. Eine Diskussion über den wissenschaftlichen Status der Geomorphometrie hat hier erst später eingesetzt und wird bspw. erst durch PIKE (1995) eindeutig beantwortet. In Deutschland ist die Entwicklung der Geomorphometrie aus der Geomorphologie heraus zu sehen und stark mit ihr verknüpft. Hier haben z.B. die acht Beiträge zum Schwerpunktprogramm zur geomorphologischen Detailkartierung in der Bundesrepublik Deutschland wichtige Standards hervorgebracht (z.B. Stäblein 1978, Barsch & Liedtke 1980, LIEDTKE 1988). Für die digitale Verarbeitung geomorphologischer Karten sind mit dem Schwerpunktprogramm *Digitale Geowissenschaftliche Kartenwerke* die Anforderungen an eine effiziente Nutzung und

Bereitstellung einer digitalen geowissenschaftlichen Basiskarte aufgestellt worden (VINKEN 1988, BARSCH & DIKAU 1989). Eine technische Weiterentwicklung hat die automatische Reliefklassifizierung durch das Computerprogramm SARA (2007) (entwickelt im Rahmen des Schwerpunktprogramms *Regionalisierung in der Hydrologie*, KLEEBERG 1999) geschaffen (KÖTHE & LEHMEIER 1993), das als Basis für auch heute genutzte Reliefklassifizierungsprogramme genutzt wird (bspw. SAGA 2007). Weitere Forschungen zur Standardisierung und Entwicklung von geomorphometrischen Parametern, insbesondere im Bereich der automatisierten Reliefklassifikation, werden von DIKAU (2006) gefordert.

PIKE (1995) stellt das Beziehungsgefüge der Geomorphometrie anschaulich in einem Diagramm dar (s. Abb. 4-19), indem bspw. die Landnutzungsanalyse, die Geomorphologie und die Fernerkundung ein Disziplinengefüge um die Geomorphometrie bilden. Die Geomorphometrie steht dabei als Werkzeug zwischen den Quell-Disziplinen, den reziproken Disziplinen und den Endnutzer-Disziplinen. Ohne weiteres lassen sich in diesem Gefüge auch weitere Disziplinen einbinden, wie die Archäologie oder die Geoarchäologie (s. Abb. 4-19).

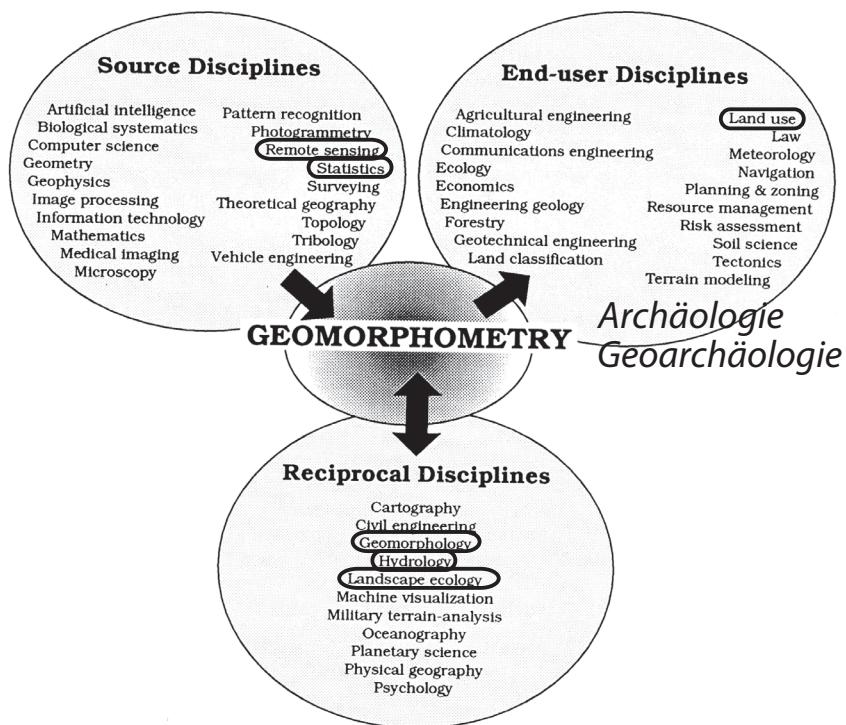


Abb. 4-19: Disziplingenfüge um die Geomorphometrie nach PIKE (1995, ergänzt). Weitere Informationen im Text.

Auch vor dem digitalen Zeitalter ist die Geomorphometrie eine zentrale Funktion bei der Analyse topographischer Formen gewesen. SONKLAR (1873) zeigte bereits erste Ansätze mit der Parametrisierung von Gebirgen, der so genannten „Orometry“ (RASEMANN ET AL. 2004; Tabelle 4-8).

Hier ist jedoch zwischen der deskriptiven Geomorphometrie (besser als Geomorphographie zu bezeichnen) mit Schlagworten wie *steil, eben, hoch, häufig, gekrümmmt* und einer mathematisch eindeutigen Beschreibung einer Reliefgrundform, der analytischen Geomorphometrie zu trennen (SOHLBACH 1978).

Tab. 4-8: Orometrische Einteilung nach SONKLAR (1873) aus RASEMANN ET AL. (2004).

Nr.	Parameter
Höhe und Hangneigung von Gebirgen und Kämmen	
1	Mittlere Gipfelhöhe des Gebirges
2	Mittlere Sattelhöhe des Gebirges
5	Mittlerer Neigungswinkel der Kammhänge
Taltiefe und relative Höhe der Kämme	
6	Mittlere Höhe der Täler
7	Mittlere Gefälle der Täler
9	Allgemeine relative Höhe der Kämme
Gebirgsvolumen	
10	Volumen aller Kämme und das des Gebirgssockels
11	Totalvolumen des ganzen Gebirges

Tab. 4-9: Zusammenstellung erster mathematisch eindeutig beschriebener geomorphometrischer Einzelemente nach SOHLBACH (1978).

Element	Autor
Hangneigung	KORISTIKA (1858), FINSTERWALDER (1890), PEUCKER (1890)
Hypsographische Kurve	BAULIG (1959)
Flussdichte	STRAHLER (1954)
Reliefenergie	PARTSCH (1911)
Hydrologische Charakteristika	SCHUMM (1956)
Beschreibung von Hangprofilen	SAVIGEAR (1960)

Letzterer führt einige zentrale Veröffentlichungen auf, die Einzelemente erstmals analytisch eindeutig beschreiben. Tabelle 4-9 gibt diese exemplarisch wieder.

Ende der 1960er und in den 1970er Jahren sind die ersten Veröffentlichungen zu den Themen Reliefanalyse, Geomorphometrie und Computer angefertigt worden. Die Arbeiten von SOHLBACH (1978) oder HORMANN (1968) sind zwei Beispiele, in denen erfolgreich versucht wird, die theoretischen Grundlagen in ein Computersystem zu übertragen. Mit der exponentiellen Erhöhung der Rechenleistung der Computer der letzten zwanzig Jahre bei gleichzeitiger Erhöhung der Auflösung flächendeckend verfügbarer digitaler Geländemodelle in den Dekameterbereich hinein sind geomorphometrische Analysen für große Flächen bis in einen Maßstab von 1:50.000 und größer möglich. Die Grundlagen der heutigen Analyseprogramme (bspw. SAGA 2007) haben sich jedoch nicht verändert und basieren auf den theoretischen Grundlagen.

Aufgrund der Vielfalt der Analysemöglichkeiten in der Geomorphometrie haben verschiedene Autoren unterschiedliche Gruppen von Parametern charakterisiert. WILSON & GALLANT (2000) stellen detailliert primäre und sekundäre topographische

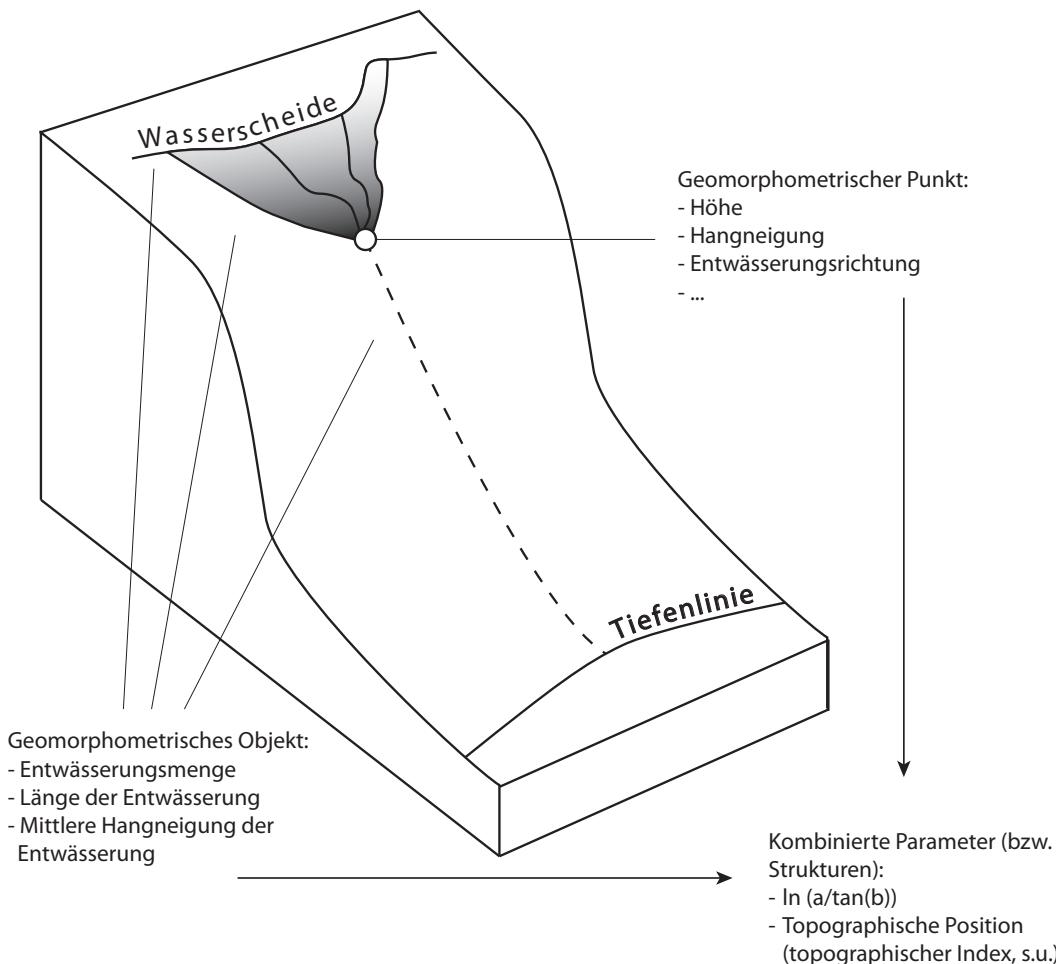


Abb. 4-20: Zusammenhang von Punkt, Objekt und Struktur nach SCHMIDT & DIKAU (1999, verändert).

Attribute vor. Dabei werden primäre, direkt aus den Höhenangaben abgeleitete, und sekundäre aus zwei oder mehreren primären Attributen bestehende Parameter unterschieden. SCHMIDT & DIKAU (1999) führen für die Einzelkomponenten (Attribute oder Parameter) der Geomorphometrie ebenfalls verschiedene Parameterstufen ein. Die Einzelkomponenten werden dabei als „geomorphometrische Punkte“, „geomorphometrische Objekte“ und „geomorphometrische Strukturen“ (SCHMIDT ET AL. 1998) bezeichnet. Abbildung 4-20 verdeutlicht den Zusammenhang der drei Komponenten

Tab. 4-10: Zusammenstellung verschiedener Parameterstufen nach SCHMIDT & DIKAU (1999). Primäre geomorphometrische Parameter sind Ableitungen, die direkt aus der Höhe eines Pixels und der benachbarten Pixel abgeleitet werden können und gliedern sich in drei Untertypen. Einfache geomorphometrische Parameter werden direkt aus den Höheninformationen unter Einbeziehung der benachbarten Pixel abgeleitet. Komplexe geomorphometrische Parameter schließen das gesamte Höhenmodell in die Berechnung mit ein. Kombinierte geomorphologische Parameter setzen sich aus zwei oder mehreren Parametern in einer analytischen Funktion zusammen. Geomorphometrische Objekte stellen Formelemente dar, die entweder flächen- oder linienhaft sind und werden aus den primären Parametern abgeleitet.

Komponente oder Parameterstufe	Beispiel	Bemerkung
Einfache geomorphometrische Parameter	Höhe Hangneigung Exposition Krümmung Drainagerichtung	
Komplexe geomorphometrische Parameter	Durchschnittliche Hangneigung eines Gebietes x- oder y-Koordinate eines nächstliegenden Drainagepunktes Länge eines Drainagestückes	
Kombinierte geomorphometrische Parameter	$h \left(\frac{a}{\tan \cdot b} \right)$ $a \cdot \tan(b)$ $a \cdot \tan(b) \cdot w \cdot h$	Bodenwasser (MOORE ET AL. 1991) „steam power“ (MOORE ET AL. 1991) „Gully development“ (MOORE ET AL. 1991)
Geomorphometrische Objekte	Einzugsgebiet oder Teileinzugsgebiet ‘flowpath’ ‘channel segment’	Linearobjekt (Hangentwässerung entlang eines Entwässerungspfades bis zum (Teil-)Einzugsgebietende) Kleinstes Element eines ‘flowpath’

und der Strukturen. Beispiele und Hinweise zu den einzelnen Komponenten sind in Tabelle 4-10 aus verschiedenen Quellen zusammengestellt.

4.3.1 Ableitung geomorphometrischer Parameter für die Nutzungspotential-Analyse

Im Folgenden werden die in Kapitel 6 genutzten Parameter näher erläutert. Diese aus dem Höhenmodell abgeleiteten Größen sind:

- Hangneigung
- Exposition
- Abflussrichtung, Drainagenetz, Abflussmenge und Einzugsgebiet
- Topographischer Index
- Günstigste Verbindung zur nächsten Drainagelinie

Hangneigung:

Die Hangneigung lässt sich mathematisch mit vielen Methoden berechnen. GUTH (1995) gibt einen Überblick über sechs verschiedene Methoden und vergleicht deren Berechnung (ebenso ZHANG ET AL. (1999) für fünf Methoden). Dabei zeigt sich, dass der Hangneigungswert abhängt ist von der benutzten Methode und es in einer Standard-Höhenmodellszene Abweichungen von bis zu 25 % im Hangneigungsmittelwert geben kann. Die stärksten Unterschiede der Algorithmen bestehen in der Anzahl der nutzenden Nachbarpixel bei der Berechnung. Es existieren Methoden, die nur vier Nachbarpixel nutzen, andere nutzen zusätzlich die Höheninformationen der vier diagonalen Nachbarpixel.

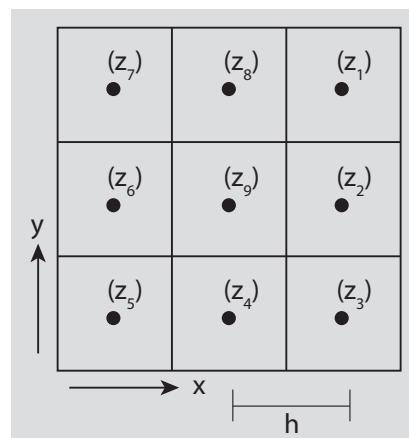


Abb. 4-21: Standardmatrix mit Bezeichnung der einzelnen Höhenpunkte 1-9, des Abstands h und der Berechnungsrichtung x und y . (verändert nach WILSON & GALLANT 2000)

Anhand eines Höhenrasters, bestehend aus neun Pixeln x_1 - x_9 (Abb. 4-21), werden zwei unterschiedliche Methoden zur Bestimmung der Hangneigung präsentiert.

Für Abbildung 4-21 lassen sich nun folgende Berechnungen feststellen (verändert nach Wilson & Gallant 2000):

$$z_{9x} = \frac{\partial z}{\partial x} \approx \frac{z_2 - z_6}{2h} \quad \text{und} \quad z_{9y} = \frac{\partial z}{\partial y} \approx \frac{z_8 - z_4}{2h}$$

für die Änderung der Höhe in x - und y -Richtung. Zusammenfassend kann dann für die Änderung r in x - und y -Richtung folgender Ausdruck definiert werden:

$$\rho = z_{9x}^2 + z_{9y}^2$$

daraus lässt sich nun die Hangneigung S für das zentrale Matrixelement z_9 ableiten: $S = \sqrt{\rho}$.

Dieser Formelzusammenhang, der in der vorliegenden Version nur die senkrechten Nachbarpixel nutzt, lässt sich auf alle acht Nachbarpixel erweitern und wird von den meisten GIS-Programmen genutzt (inkl. aller Arc-Programme der Firma ESRI) (z.B. GUTH 1995, WILSON & GALLANT 2000).

Daneben existiert aber auch eine Hangneigungsbeschreibung, die zwar etwas geringere Werte ergeben kann, jedoch für die Analyse von Fließberechnungen besser geeignet ist, da die Hangneigung immer nur in Richtung des stärksten Gradienten berechnet wird. Folgende Formel zeigt in Verbindung mit Abbildung 4-21 den Zusammenhang der D8-Methode („deterministic eightnode“ nach O'CALLAGHAN & MARK 1984):

$$S_{D8} = \max_i \frac{z_9 - z_i}{h\Phi(i)} \quad \text{mit} \quad i \in 1-8 \quad \text{dabei ist } h\Phi(i) \text{ die Entfernung der Pixel; für die Kardinalrichtungen 1 und für die anderen Richtungen (2,4,6 und 8) ist der Wert } \sqrt{2}.$$

Um zwei Gebiete und Modelle hinsichtlich der Hangneigung zu vergleichen oder deren Werte in späteren Berechnungen zu benutzen, ist es äußerst wichtig, für beide

Modelle und Räume die gleiche GIS-Software zu benutzen oder genaue Informationen über die Hangneigungsberechnungs-Methode der Programme zu kennen (dies ist für die meisten GIS-Programme jedoch nicht möglich, da der genutzte Algorithmus nicht hinterlegt ist).

Exposition:

Die Exposition ist nur dann für ein zentrales Pixel definiert, wenn die Hangneigung größer als null ist; sie wird dann als Richtung der stärksten Hangneigung in der Umgebung der acht Nachbarpixel definiert (vgl. zweite Methode zur Hangneigungsberechnung). Für statistische Berechnungen wird die Exposition meist in zwei Komponenten zerlegt und normiert (vgl. Kap. 6.2.1).

Abflussrichtung, Drainagenetz, Abflussmenge und Einzugsgebiet:

Die vier geomorphometrischen Parameter stehen in einer engen Beziehung zueinander und lassen sich jeweils aus den vorhergehenden berechnen. Abbildung 4-22 verdeutlicht den Zusammenhang.

Aus den einzelnen Höhenwerten eines Höhenmodells (Abb. 4-22a) lässt sich eine Matrix (Abb. 4-22b) anfertigen, die die Richtung der stärksten Neigung angibt (vgl. Hangneigung und Abb. 4-22b). Dabei wird eine Kodierung der Richtung nach Abbildung

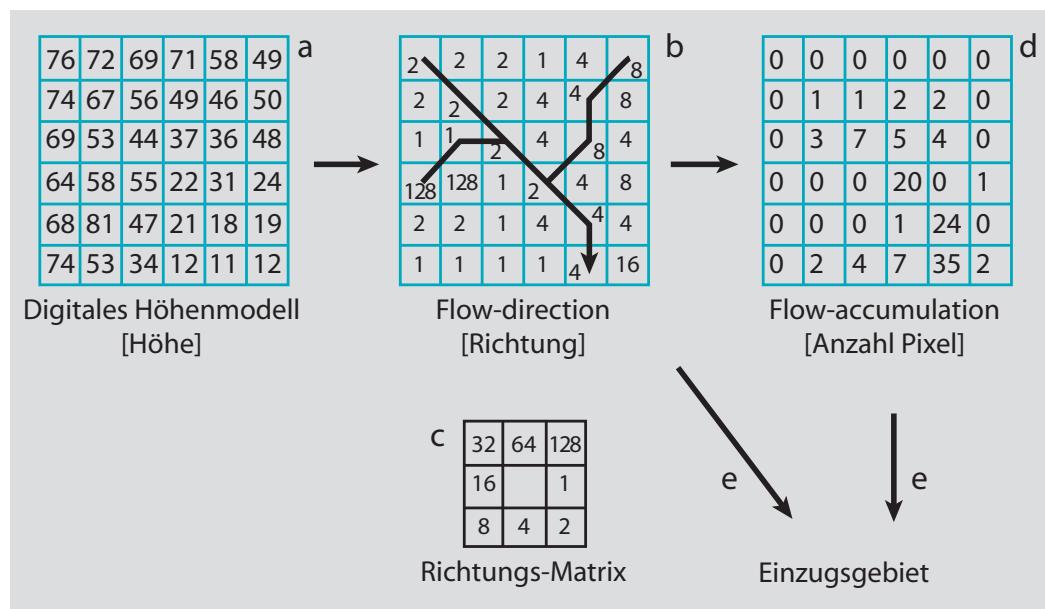


Abb. 4-22: Zusammenhang zwischen Höhenmodell, „Flow-direction“ (Abflussrichtung), und „Flow-accumulation“ (Abflussmenge). Weitere Informationen im Text. (eigener Entwurf)

(4-22c) genutzt. Aus dieser Richtungsmatrix lässt sich ein Vektor, das Drainagenetz, ableiten (Abb. 4-22b). Durch Aufsummierung der *durchquerten* Pixel lässt sich eine Matrix der ‚Flow-accumulation‘ (Abflussmenge) erzeugen (Abb. 4-22d), die zusammen mit dem Drainagesystem genutzt wird, um ein Einzugsgebiet zu berechnen (Abb. 4-22e). Dabei wird ausgehend von einem definierten Punkt auf dem Netz des Drainagesystems die Wasserscheide des Geländes oberhalb berechnet. Die Funktionen zur Berechnung hydrologischer Parameter sind in vielen GIS-Programmen enthalten (bspw. ArcHydro für ArcGIS, MAIDMENT 2002). Speziell für diese Aufgaben entwickelte Programme liefern jedoch meist bessere Ergebnisse und sind transparenter gegenüber den genutzten Algorithmen. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit das in der Software ‚Watershed Modelling System‘ (WMS 2007) implementierte Modul ‚TOpographic PArameteriZation‘ (TOPAZ 2007, GARBRECHT & MARTZ 2000) genutzt, um die ‚Flow-direction‘, ‚Flow-accumulation‘ und die Einzugsgebiete sowie alle dazugehörigen Attributdaten (z.B. Fläche, Drainagelänge, etc.) zu berechnen.

Topographischer Index:

Ein topographischer Index gibt eine relative Position eines Höhenpixels in seiner Umgebung an. Für diese Position existieren sehr viele Parameter (einige stellen WILSON & GALLANT 2000 vor), die für die unterschiedlichsten Fragestellungen genutzt werden. Obwohl die Literatur viele Hinweise für den Einsatz bestimmter geomorphometrischer Parameter gibt, fehlen immer noch Standards zu den Algorithmen von geomorphometrischen Parametern und Objekten, sodass in diesem Bereich noch ein enormer Forschungsbedarf besteht (DIKAU ET AL. 2006). In der vorliegenden Arbeit werden zwei topographische Parameter (vgl. Kap. 5.5.4 und 6.2.1) genutzt, die im Folgenden vorgestellt werden.

Topographischer Index nach Myburgh (1974)

Dieser Index wird ursprünglich dazu genutzt, den Zusammenhang zwischen der mittleren lokalen Temperatur aus mittleren monatlichen Temperaturdaten und der Topographie von Klimastationen zu untersuchen. Der Index soll dabei die Lage der Stationen hinsichtlich des umgebenden Reliefs ausdrücken. Entsprechend lässt er

sich nutzen, um allgemein eine mittlere Höhenposition aus einem Höhenmodell abzuleiten.

Nach Abwandlung und Optimierung für den Einsatz in einem digitalen Höhenmodell ergibt sich für ein quadratisches Pixelfeld für den topographischen Index *TOPO*:

$$Topo = (H_z - H_{\min}) \cdot \left(\frac{\hat{H}_n}{(n-1)} \right) \quad \text{mit} \quad \begin{aligned} H_z & \quad \text{Höhenwert des Zentralpixels} \\ H_{\min} & \quad \text{Höhenwert des Pixels mit der} \\ & \quad \text{geringsten Höhe im Pixelfeld} \\ \hat{H}_n & \quad \text{Höhenunterschied im Pixelfeld} \\ n & \end{aligned}$$

n Anzahl der Pixel im Pixelfeld
(bspw. 5x5)

Der Wert ist damit umso größer je höher die lokale Reliefenergie im Pixelfeld ist und der Wert ist null, wenn das Zentralpixel eine Senke darstellt.

Topographischer Index nach DIKAU ET AL. (1995)

Ein anderer Index zur Analyse einer ‚cuesta scarp landscape‘ (Schichtstufenlandschaft) beschreibt theoretisch HAMMOND (1964), indem er ‚uplands‘ und ‚lowlands‘ identifiziert. Die Beschreibung stammt aus der Reliefformklassifizierung des US-Bundesstaates New Mexico, bei der Hammond auf Grundlage von Höhenlinienkarten ein Verfahren zur Reliefgliederung entwickelt und auf die ganze USA angewendet hat. DIKAU ET AL. (1995) greifen die Gliederung auf und versuchen, mittels geomorphometrischer Analysen die Ergebnisse nachzuempfinden. Dabei müssen die einzelnen Parameter in mathematische Formeln umgewandelt werden.

Abbildung 4-23 zeigt schematisch die Definition von ‚upland‘ und ‚lowland‘ und ihre mathematische Ableitung.

In Kapitel 5.5.4 wird der Zusammenhang genutzt, Longitudinaldünen vom umliegenden Relief zu trennen. Hierzu muss der mathematische Zusammenhang aus Abbildung 4-23 in eine Anweisung für GIS-Programme umgesetzt werden.

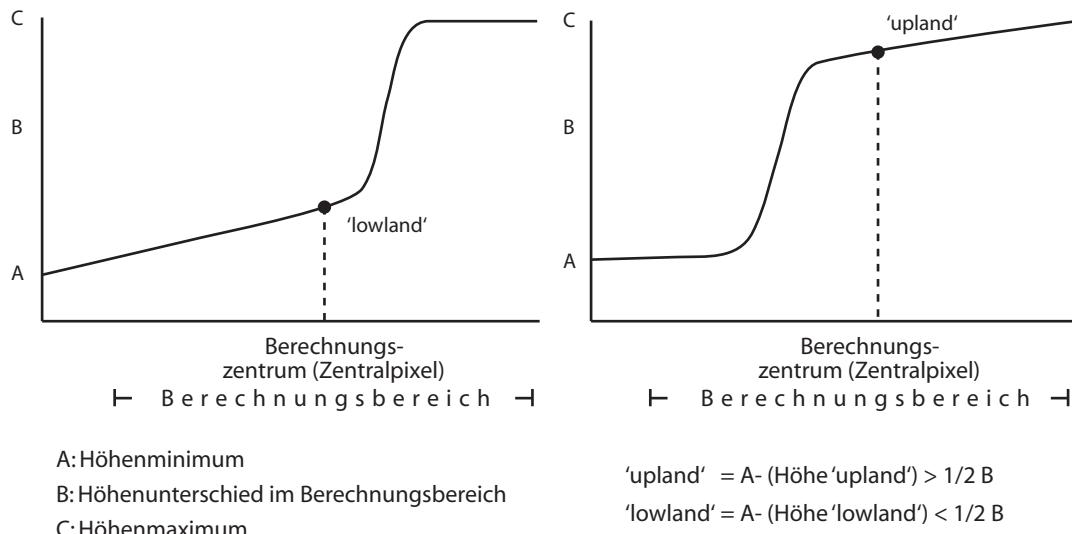


Abb. 4-23: Schematische Darstellung zur Trennung von ‚upland‘ (Hochland) und ‚lowland‘ (Tiefland) (verändert nach DIKAU ET AL. 1995). Weitere Informationen im Text.

Der Ausdruck

`Focalmax([DEM], rectangle, 10, 10) - [DEM] < (Focalrange([DEM], rectangle, 10, 10) / 2)`

zeigt, dass die Anweisung von der mathematischen Darstellung nicht stark abweicht. Der Berechnungsbereich ist im vorliegenden Fall mit 10x10 Pixeln angegeben. ‚Focalmax‘ gibt das Maximum und ‚Focalrange‘ gibt den Höhenunterschied in diesem Bereich des Höhenmodells ‚DEM‘ an (es handelt sich hier um eine ArcGIS SpatialAnalyst Anweisung der Version 9.2).

Günstigste Verbindung zur nächsten Drainagelinie:

Ein weiterer Faktor, der als geomorphometrisches Objekt nach Tabelle 4-10 bezeichnet werden kann, ist die günstigste Verbindung in einem Höhenmodell zu einer vorher

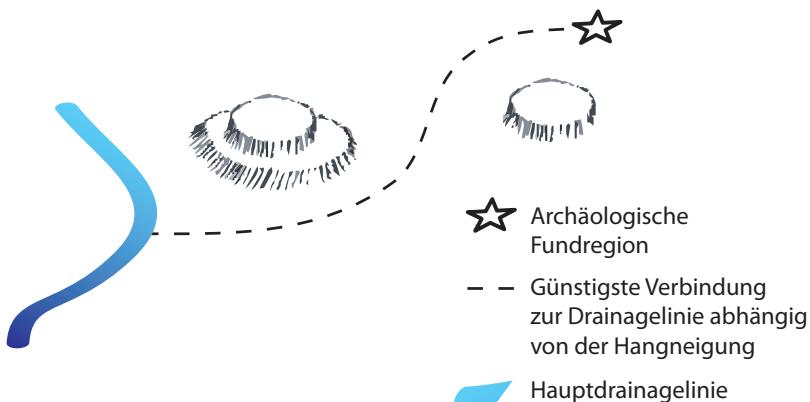


Abb. 4-24: Schematische Darstellung zur Bestimmung der günstigsten Verbindung zur nächsten Drainagelinie abhängig von der Hangneigung. In der Berechnung wird aus der Hangneigungskarte ein Abhängigkeitsraster erzeugt, das bestimmte Regionen als bevorzugt belegt. Dabei wird je nach Hangneigung eine Abstufung zwischen null und eins erzeugt. (eigener Entwurf)

definierten Drainagelinie. Dieser Parameter ist dabei im vorliegenden Fall abhängig von der Hangneigung des Systems und erfasst somit eine *günstige* Entfernung zur nächsten Tiefenlinie. Abbildung 4-24 zeigt graphisch den Zusammenhang.

4.4 Kanonische Korrespondenzanalyse

Im Rahmen der statistischen Analyse der Umwelt- und Fundplatzdaten bietet die Kanonische Korrespondenz-Analyse (‘Canonical correspondence analysis’ oder CCA) ein mögliches statistisches Analyseverfahren. Die CCA wurde in den 1980er Jahren entwickelt, um Beziehungen zwischen Umweltvariablen zu testen und diese auszuwählen (TER BRAAK 1986). Dabei steht die Frage im Vordergrund inwieweit die Ausprägung einer Gruppe von Variablen durch Veränderungen der Umweltparameter erklärt werden kann (JONGMAN ET AL. 1995). Damit gehört die CCA zu einer Kernmethode der Landschaftsökologie und findet sich häufig in der Methodenliteratur (z.B. TURNER & GARDNER 1991, JONGMAN ET AL. 1995, WU & HOBS 2007b). Die CCA gehört zur Gruppe der multivariaten statistischen Verfahren (BAHRENBERG ET AL. 1992) und hat zur Aufgabe komplexe Daten, die aus mehreren Variablen bestehen so darzustellen, dass die Zusammenhänge der Variablen erkennbar werden und dies bei möglichst geringem Datenverlust. Die CCA steht dabei auf gleicher Stufe mit der Faktorenanalyse, der mehrdimensionalen Skalierung oder der Clusteranalyse. Die Korrespondenzanalyse wird graphisch mit einem zweidimensionalen (Biplot) oder dreidimensionalen Diagramm (Triplot) ausgewertet. Als Eingabeveriablen sind nominal-, ordinal- oder metrisch skalierte Daten nutzbar.

Das Einsatzgebiet oder die Entwicklungsumgebung ist der Ökologie zuzuordnen, um hier Systematik-Analysen durchzuführen oder bspw. den Zusammenhang zwischen Vorkommen und Umwelteinflüssen mit Geographischen Informationssystemen und Statistik zu untersuchen (z.B. TITEUX ET AL. 2004). Die CCA wird auch in der Archäologie (z.B. MÜLLER & ZIMMERMANN 1997) oder Geohydrologie (z.B. CARATTI ET AL. 2004) eingesetzt.

Ein zentraler Punkt der CCA bildet die Chi-Quadrat-Distanz (χ^2 -Distanz) (z.B. CONNOLLY & LAKE 2006), die die Abstände der einzelnen Parameter und damit im weiteren Sinne die Abhängigkeit der Parameter untereinander berechnet.

Die Einzelschritte der CCA sind (zusammengestellt nach BLASIUS 2001, BRONNER ET AL. 1991 und BOMBIK ET AL. 2002):

1. Erstellung der Ausgangsmatrix bestehend aus allen Parametern:

Die Parameter sind alle normiert – meist auf den Bereich zwischen 0 und 1 – und somit dimensionslos. In der vorliegenden Arbeit bestehen die Daten aus zwei Matrizen, den Umgebungsvariablen und den raumbezogenen Ausprägungsdaten einer archäologischen Fundregion.

2. Bildung der Spalten- und Zeilenprofile:

Hierbei handelt es sich um Matrizen, die die Informationen einer Datentabelle einmal in Hinblick auf eine Spalte und einmal in Hinblick auf eine Zeile auswerten. Dabei spielen zum einen die Einzelwerte eine Rolle, zum anderen aber auch die Breite der Randverteilung (also die Spannweite, die ein Parameter umfasst).

3. Festlegung der geometrischen Schwerpunkte der einzelnen Parameter:

Der Schwerpunkt wird ermittelt über die Gewichtung mit der Masse der einzelnen Parameter. Die Masse entspricht dabei der gesamten Variation eines Parameters. Je größer diese ist umso höher ist seine Masse.

4. Berechnung der χ^2 -Distanzen:

Die Abstände werden als euklidische Distanz ermittelt, die gewichtet wird mit dem Inversen des Distanzprofils, um die unterschiedlichen Skalen der Randsummen zu berücksichtigen. Damit ist der Wert proportional zur χ^2 -Statistik und wird als χ^2 -Distanz bezeichnet (der Wert darf nicht mit einer Entfernung im physikalischen Sinne verwechselt werden).

5. Reduzierung der Dimensionen:

Da graphisch zwei, höchstens drei Dimensionen dargestellt werden können, muss die Anzahl der Dimensionen reduziert werden. Das Verfahren ähnelt dabei der Hauptkomponentenanalyse, bei der versucht wird die Anzahl der Achsen bei möglichst geringem Informationsverlust zu reduzieren. Dazu werden orthogonale Achsen im mehrdimensionalen Raum bestimmt, die die Gesamtheit der Variablen möglichst genau abbilden.

Die Auswertung der CCA kann in einem Biplot erfolgen (BLASIUS 2001). Das Biplot wurde ursprünglich für die Auswertung von Hauptkomponentenanalysen entwickelt,

kann aber durch die Reduzierung der Dimensionen (s.o.) auch bei der CCA verwendet werden. In einem rechtwinkligen Koordinatensystem, bestehend aus den beiden ersten Hauptachsen, bildet der Nullpunkt den Schwerpunkt des Systems, von dem aus die Umgebungsvariablen mittels Vektoren abgebildet werden. Auf diese Achsen können die Entferungen der Untersuchungsvariablen projiziert werden und so der Abstand zum Scheitelpunkt der Umgebungsvariablen abgelesen werden. Die Reihenfolge, die durch die Abstände gebildet wird, lässt sich nun einfach ablesen. Abbildung 4-25 zeigt das Beispiel eines Biplots, das eine Auswertung verdeutlicht. Wird der Umweltparameter A betrachtet, so zeigt das Beobachtungselement α den größten Zusammenhang. γ zeigt den geringsten Zusammenhang. Gegensätzliche Parameter (A und E) entsprechen gegensätzlichen Beziehungen bezogen auf die Beobachtungselemente und gelten als unkorreliert. Achsen, die in ähnliche Richtungen zeigen, haben ähnliche Beziehungsgefüge (C, D). Bei nahe zusammen liegenden Beobachtungselementen

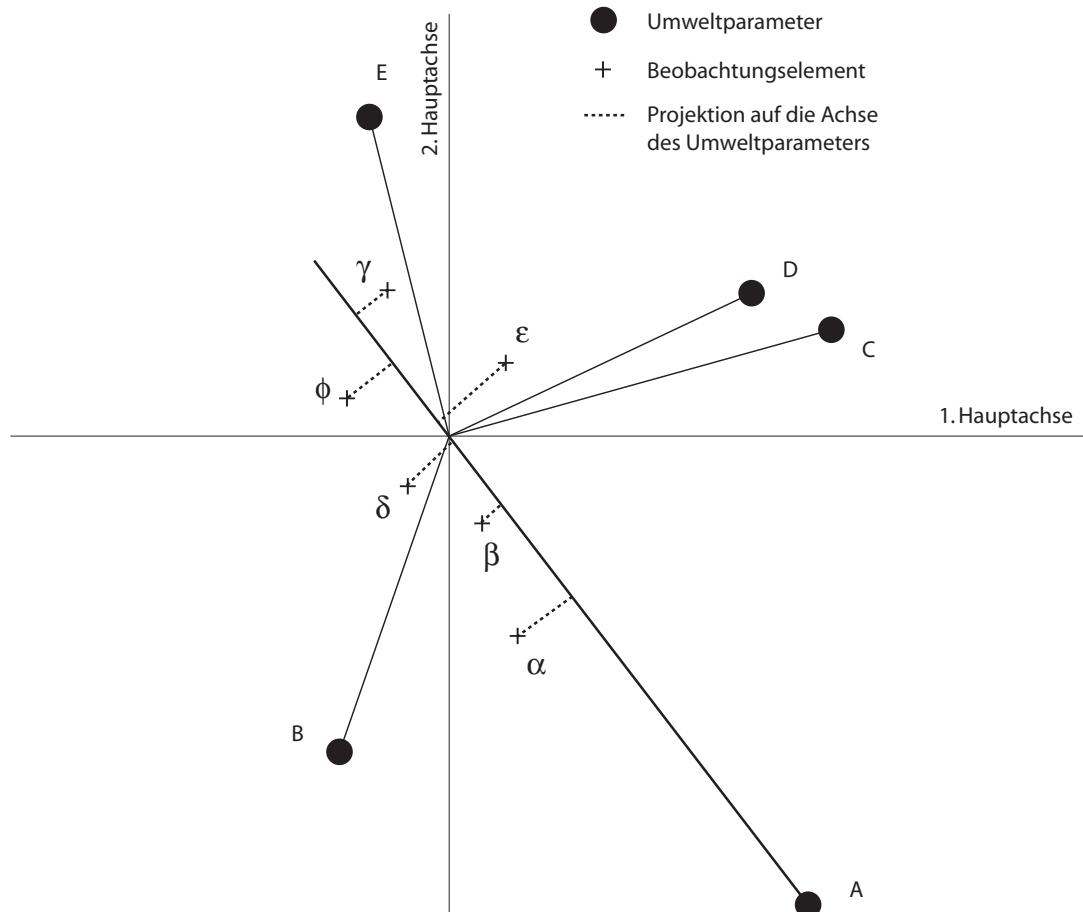


Abb. 4-25: Beispiel eines Biplots. Weiter Informationen im Text. (eigener Entwurf)

kann es aufgrund der Projektion auf die Achse des Umweltparameters zur Vertauschung kommen, da die Achsen aufgrund der Hauptachsentransformation nur einen Teil der Varianz des Systems abbilden und unter Umständen in der Abbildung des Biplots eine Ungenauigkeit darstellen.

In Kapitel 6 wird die CCA im praktischen Fall mit den Eingabeveriablen und ihren Ergebnissen dargestellt.

5. Studien zur Nutzbarkeit und Abschätzung der Qualität der Höhendaten

Im Rahmen des Teilprojektes E1 des SFB 389 wurden vom Autor meist in interdisziplinären Fragestellungen verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurden beide in Kapitel 4.2.2 vorgestellten Modelle geprüft und für den Einsatz zur Ableitung von holozänen Nutzungspotentiale evaluiert. Da beide Modelle kurz nach der ersten Verfügbarkeit (ASTER Anfang 2002; SRTM-3 Mitte 2004) eingesetzt wurden, konnte nicht auf andere Untersuchungen aus der Literatur zurückgegriffen werden. Daneben spielen der Einsatzzweck und die Einsatzregion bei der Bewertung der Nützlichkeit der Modelle eine große Rolle, sodass Untersuchungen aus anderen Regionen nur teilweise übertragbar sind.

Für die Analyse der Nutzbarkeit und des Fehlers der Modelle stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Ein einfacher Fehlerabschätzungsschritt ist der Vergleich der Höhe mit einer bekannten anderen Höhe. Das Problem im Untersuchungsgebiet, das teilweise kaum erschlossen ist, besteht jedoch darin, dass hier so gut wie keine verlässlichen Höhendaten vorhanden sind. Speziell für die Western Desert Ägyptens heißt das, dass außerhalb der Oasen keine Höhendaten und innerhalb der Oasen keine standardisierten Höhendaten vorliegen, die für Vergleiche nutzbar wären.

Im Folgenden werden einige Methoden und Untersuchungen vorgestellt, mit denen die Qualität und die Einsatzmöglichkeiten abgeschätzt werden. Zunächst wird mit Tabelle 5-1 eine Sammlung präsentiert, die die Fehlerabschätzungen zu ASTER- und SRTM-Daten in der Literatur der letzten Jahre zusammenfasst. Die Zusammenstellung zeigt für beide Modelle ein recht unterschiedliches Bild für die angegebenen Fehler. Zunächst fällt auf, dass die Fehler für die SRTM-3-Daten geringer sind als die Fehler für die ASTER-Daten und dass wesentlich weniger Studien zum Fehler der SRTM-3-Daten existieren. Diese kommen jedoch zu sehr ähnlichen Fehlern, wenn die gleiche Vergleichsquelle genutzt wird (bspw. BOLTEN & BUBENZER 2006 und die Arbeiten unter Beteiligung von CZEKKA). Der sehr stark schwankende Fehler der ASTER-Daten lässt sich auf verschiedene Faktoren zurückführen:

- Die Vergleichsdaten, mit denen die Höhenfehlerabschätzung durchgeführt wurden, sind sehr unterschiedlich und weisen selbst Fehler auf, die meist nicht in die Fehlerberechnung eingeflossen sind (eine Angabe über die Verrechnung wird in den meisten Fällen nicht gemacht).

Tab. 5-1: Zusammenstellung der Fehlerabschätzungen zu ASTER- und SRTM-3-Höhendaten. Weitere Informationen im Text. (eigene Erhebung)

Literaturangabe	Höhenfehler (m)	Vergleichsdaten	Bemerkung	Region
ASTER				
BOLCH & KAMP (2003)	-89	Digitalisierte Höhenlinien aus 1:50.000	Hochgebirge zwischen 4000 und 6000 m	Chile - Bolivien
ABRAMS (2000)	± 10-30	-	Schätzung	-
TOKUNAGA (1996)	± 12,5	Entnommen aus 1:25.000	Vorhersage aus einer Studie	Japan
TOUTIN & CHENG (2001)	< 25	USGS 7.5 DHM	Gebirge zwischen 1300 und 2600 m	USA
TOUTIN & CHENG (2002)	± 1,6	USGS 7.5 DHM	Zusätzlich SPOT-DGM verglichen (± 4,6 zum USGS DEM)	nicht angegeben
KÄÄB (2002)	60 18	DHM aus Luftbildern	-	
KÄÄB (2005)	± 20-70	SRTM-3	Fehler ist abhängig vom Relief (hohe Hangneigungen erhöhen den Fehler)	Bhutan
KAMP ET AL. (2003, 2005)	± 7-50	Digitalisierte Höhenlinien	-	Bolivien/ Chile
HIRANO ET AL. (2003)	± 7-15	USGS 7.5 DHM plus DGPS-Daten	Histogramm positiv verschoben („Hüll-DEM“) vgl. BOLLEN & BUBENZER 2006)	Japan / USA / Chile - Bolivien
ECKERT ET AL. (2005)	± 10-30	1:50.000 Topographische Karte (Argentinien) diverse Höhenmodelle (Radar, Höhenlinienscan) (Schweiz)	Fehler ist abhängig vom Relief (hohe Hangneigungen erhöhen den Fehler)	Argentinien / Schweiz
WELCH ET AL. (1998)	± 15-25	USGS 7.5 DHM	-	USA
FUJISADA ET AL. (2005)	± 20	DGPS NED	-	Japan USA
STEVENS ET AL. (2003, 2004)	± 15 ± 10	TOPSAR LINZ	Vulkankartierung im Vergleich zu TOPSAR (± 1-3 m) (interferometrische Daten aus Flugzeugmessungen (STEVENS ET AL. 2003) und LINZ (Land Information New Zealand; aus Höhenlinien abgeleitet)	Neuseeland
RIVERA ET AL. (2005)	± 17	Photogrammetrisch erzeugtes DHM GPS-Daten	-	Argentinien
CUARTERO ET AL. (2005)	± 13	DGPS	Erdas Imagine erzeugt ein TIN am Besten; Orthoengine (PCI) erzeugt das beste Raster-Höhenmodell	Spanien

Fortsetzung auf der nächsten Seite.

Tab. 5-1: Fortsetzung.

Literaturangabe	Höhenfehler (m)	Vergleichsdaten	Bemerkung	Region
BOLTEN & BUBENZER (2006)	± 5,9	DHM 50	Abhängig von der Reliefenergie	Deutschland
SRTM-3				
BAMLER (1999)	± 16 ± 6 ± 20 ± 10	-	(Schätzungen) SRTM-X absolut SRTM-X relativ SRTM-C absolut SRTM-C relativ	-
KOCH ET AL. (2002)	± 8,9	DGM 5	SRTM-X	Deutschland
CZEGKA (2005)	± 7	DHM 50 Landesvermessungsamt	-	Deutschland
CZEGKA & BRAUNE (2005)	< 6,2	DHM 50 Landesvermessungsamt	-	Deutschland
MILIARESIS ET AL. (2005)	± 19 ± 6,6	Griechisches Militär-Höhenmodell (1:100.000 mit 100 m Äquidistanz und weitere Höhendaten)	SRTM-C absolut SRTM-C relativ	Kreta
NIKOLAKOPOULOS ET AL. (2006)	± 8	ASTER DHM	Keine unabhängige Vergleichshöhe	Kreta
BOLTEN & BUBENZER (2006)	± 6,9	DHM 50	Abhängig von der Reliefenergie	Deutschland

- Der Fehler ist abhängig vom Relief, da bspw. im Hochgebirge durch geringe horizontale Abweichungen an Steilhängen große vertikale Fehler auftreten können.
- Aufgrund der Erzeugung der ASTER-Höhenmodelle aus *visuellen* Daten schwankt die Qualität der einzelnen Szenen je nach atmosphärischen Gegebenheiten. Dies kann sich auch auf die Genauigkeit der Höhendaten auswirken.
- Aride Gebiete ohne Bewölkung und mit einer klaren trockenen Atmosphäre liefern für gewöhnlich wesentlich bessere Bilder als Szenen aus den mittleren oder hohen Breiten sowie aus den Tropen.

5.1 Rheinisches Schiefergebirge (Deutschland)

Für einen Teil des rheinischen Schiefergebirges werden zur Fehlerabschätzung das ASTER- und das SRTM-3-Modell mit dem DGM 50 des Landesvermessungsamtes NRW (LVERM 2007a) verglichen (Abb. 5-1). Für diese erste Studie wurde ein bekanntes Gebiet mit verfügbaren standardisierten digitalen Höhendaten ausgewählt, obwohl eine Übertragung der Ergebnisse in das Untersuchungsgebiet nicht direkt möglich ist.

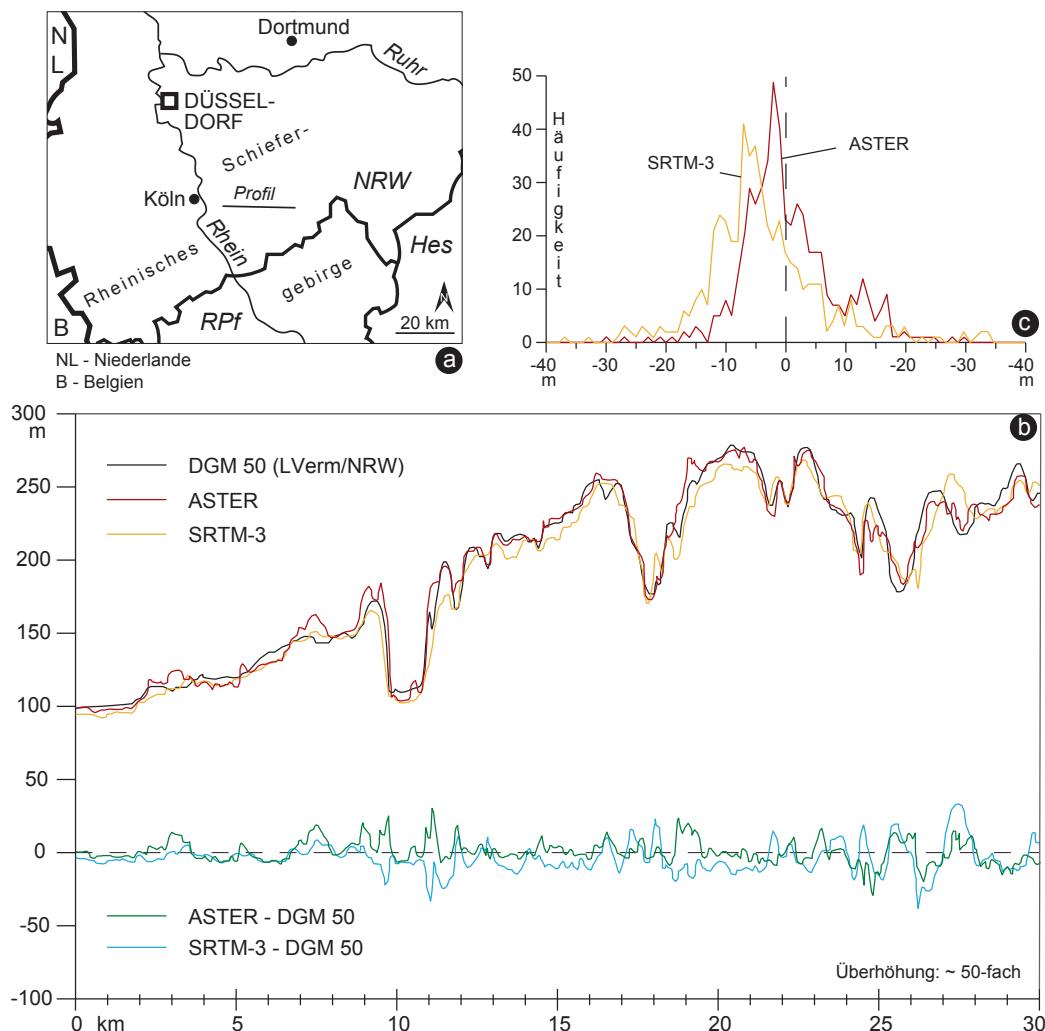


Abb. 5-1: ASTER-, SRTM-3- und DGM 50-Daten im rheinischen Schiefergebirge. (a) Lage des Profils, (b) Profilverläufe und Differenzen und (c) Abweichungen im Histogramm (weitere Informationen im Text). (verändert nach BOLLEN & BUBENZER 2006)

In einem ersten Schritt müssen die drei Modelle so angeglichen werden, dass ein Vergleich möglich ist. Das bezieht sich auf die Pixelauflösung und – vor allem – auf die Projektion der Daten. Da das ASTER- und SRTM-3-Modell projekionsspezifisch gleich ist (beide Modelle nutzen das WGS 84-System (ASTER USER GUIDE 2007, JPL 2007b)), wird hier nur die Auflösung angeglichen und für beide Modelle auf 90 m

korrigiert. Dabei kommt für das ASTER-Modell ein Interpolationsverfahren zum Einsatz, das jeweils 3x3 Pixel zu einem neuen Pixel zusammenfasst. Dabei wird die neue Höhe dieses Pixels durch ein einfaches geometrisches Mittel errechnet.

Dieses einfache Verfahren gewährleistet, dass möglichst keine Verfälschung stattfindet. Um Kantenbildung bei einer solchen Vergrößerung eines Höhenmodells auszuschließen, existieren andere Verfahren, die weitere Höhenwerte der umgebenden Pixel nutzen, um eine neue Höhe eines Zentralpixels zu errechnen (z.B. CONOLLY & LAKE 2006, s.a. Kap. 5.5.4). Beim SRTM-3-Modell wird die Auflösung von 3 Bogensekunden in glatte 90 m umgerechnet. Beide Modelle nutzen nun UTM-Koordinaten basierend auf dem WGS 84-Sphäroiden.

Das DGM 50 nutzt die Projektion des Deutschen Hauptdreiecksnetzes (DHDN Zone 2), nutzt also Gauß-Krüger-Koordinaten basierend auf dem Bessel-Sphäroiden 1881 (vgl. HAKE & GRÜNREICH 2002). Die Problematik, die sich dabei ergibt, besteht darin, dass die genutzten Höhen ebenfalls auf diesen Sphäroiden bezogen sind und damit von anderen Erdparametern ausgehen als im WGS 84-Sphäroid genutzt werden. Für die Transformation zwischen diesen beiden Sphäroiden existieren für bestimmte Regionen der Erde unterschiedliche Transformations-Parameter. Das Landesvermessungsamt NRW bietet mit dem PC-Programm „TRABBI-3D“ (LVERM 2007b) die Möglichkeit für Nordrhein-Westfalen Höhendaten zu konvertieren, sodass es möglich ist, die Daten des DGM 50 in das UTM-System verlustarm überzuleiten.

Zum Vergleich der Modelle wurde ein Profilverlauf gegenüber gestellt (Abb. 5-1a,b). Zunächst erkennt man einen ähnlichen Verlauf der drei Profile. Mittels der Differenz zum DGM 50 lassen sich die Abweichungen der beiden Modelle zum DGM 50 errechnen. Für das SRTM-3-Modell erhält man eine mittlere Abweichung von $\pm 6,9$ m (Standardabweichung: 9,7 m) und für das ASTER-Modell eine mittlere Abweichung von $\pm 5,9$ m (Standardabweichung: 7,8 m). Natürlich sind im Differenzgraphen stärkere Abweichungen an einigen Stellen zu erkennen. Gerade an Geländekanten werden diese sehr deutlich, da hier aufgrund von geringen horizontalen Abweichungen hohe Differenzen der Graphen auftreten können. Der Absolutfehler der Modelle ist aufgrund des Fehlers des DGM 50 etwas höher, da der Fehler des Referenzmodells mit eingerechnet werden muss. Es steht jedoch der Vergleich und der relative Unterschied

der beiden Modelle im Vordergrund, sodass im vorliegenden Fall darauf verzichtet wird.

Das Histogramm beider Differenzgraphen (Abb. 5-1c), das die Abweichung der Differenzen in Höhenklassen anzeigt, weist eine interessante Auffälligkeit auf, die auch von KOCH ET AL. (2002) für die kommerziellen SRTM-X-Band Daten (vgl. Kap. 4.2.2.4) beschrieben wird. Aufgrund der Kalibration der SRTM-Daten über Küstenlinien ergeben sich absolute Unter- oder Überschätzungen der Höhendaten, die sich im Histogramm als verschobener Peak niederschlagen. Das ASTER-Modell (Hauptpeak liegt zentraler) weist einen zweiten Peak bei +10-20 m auf. Nach weiteren Untersuchungen liegt dieser Bereich der positiv abweichenden Pixel vor allem über Baumbestand, was bedeutet, dass hier das Gelände über Vegetation erfasst wurde. Aufgrund der Erzeugung der ASTER-Geländemodelle (s. Kap. 4.2.2.3) aus visuellen Satellitenbildern ist dieser Umstand verständlich, da quasi ein Hüllmodell der Erdoberfläche inklusive Bebauung und Vegetation erzeugt wird. Dies entspricht der Definition eines Digitalen Oberflächenmodells (DOM) (vgl. Kap. 2.1.2). Zwar besteht auch ein Zusammenhang zwischen SRTM-Daten und der Streuung an Baumbestand (KELLENDORFER ET AL. 2004, KOCH ET AL. 2002, WALKER ET AL. 2007). Die Streuung der Radardaten bzw. die Durchdringung von Baumbestand sind jedoch stark abhängig von der Dichte und Art der Bäume. Im vorliegenden Fall ist jedoch der Effekt der Fehlkalibration höher einzuschätzen.

Für den Nutzen des ASTER-Modells in ariden Gebieten, mit sehr wenig geschlossener Vegetation und Bebauung, stellt die Erfassung eines DOM jedoch kein Problem dar.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Fehler zu einem validierten Modell (DGM 50) mit Beträgen im Mittel von unter 10 m als gering bezeichnet werden kann, zumal die ASTER-Auflösung künstlich vergröbert wurde. Dennoch ist zum einen darauf zu achten, welche Formen und Formgrößen untersucht werden sollen. Die oben angesprochene Problematik der Übertragung der Ergebnisse in eine andere Region, in der andere naturräumliche Gegebenheiten herrschen, wird durch die Ableitung eines DOM bestätigt. Die ASTER-Höhendaten eignen sich nur bedingt für geomorphologische Fragestellungen in Regionen mit hohem und dichtem Baumbestand.

5.2 Umm Badr (Sudan)

Eine weitere Möglichkeit zwei Geländemodelle zu vergleichen – gerade für Regionen in denen kein Referenzmodell zur Verfügung steht – ist der Vergleich von abgeleiteten Parametern. Hier bietet es sich an, diese, wenn möglich, mit aus dem Feld erhobenen Daten zu vergleichen. Für eine solche Untersuchung ist bevorzugt ein arides oder semiarides Gebiet ausgesucht worden.

Für die Region Umm Badr im Zentralsudan liegt eine von JÄKEL & RÜCKERT (1998) angefertigte geomorphologische Karte vor, die in Feldaufenthalten angefertigt wurde (Mündliche Mitteilung durch Prof. Jäkel am 1.2.2003, anlässlich der Präsentation

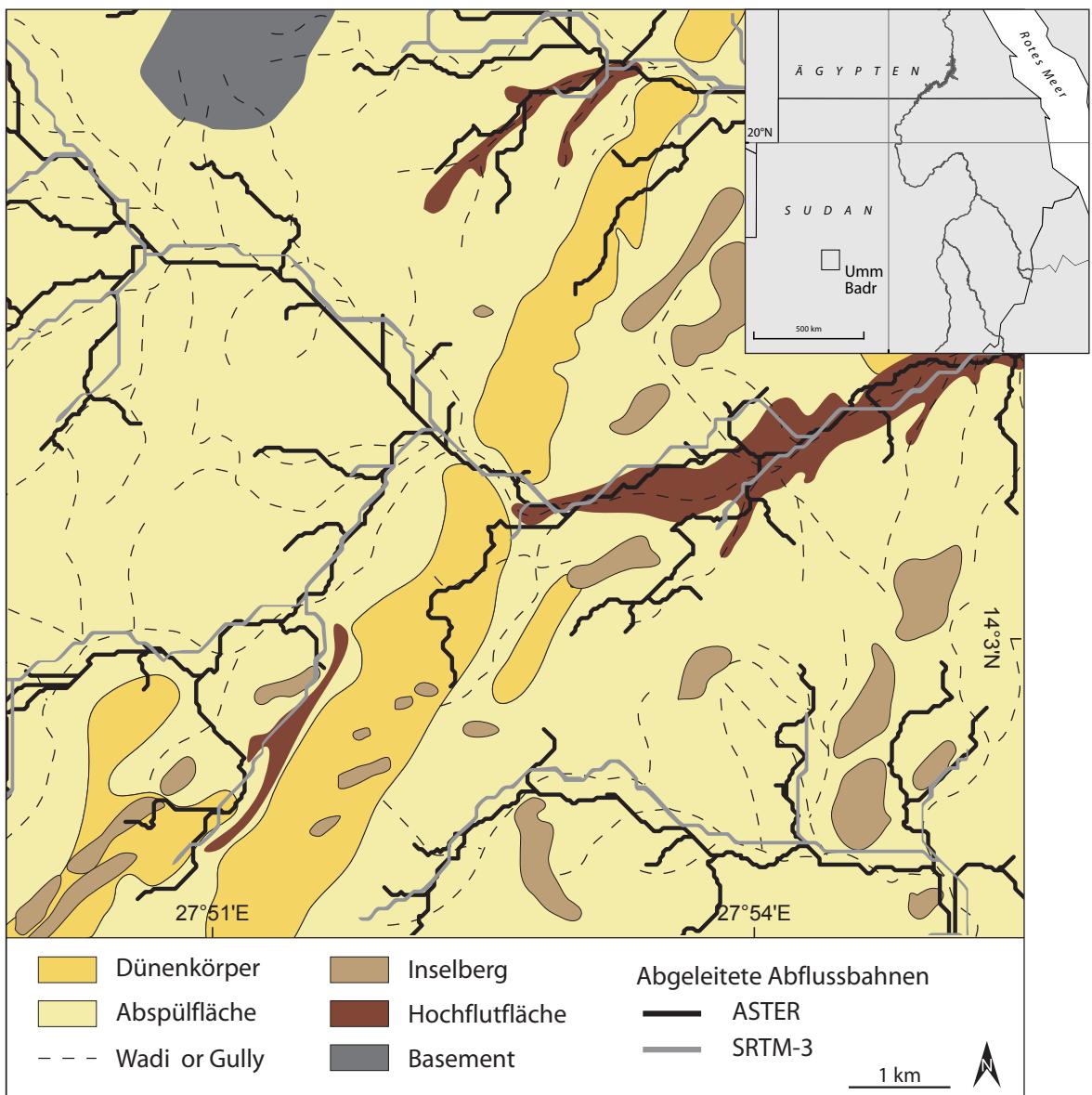


Abb. 5-2: Ausschnitt der Region Umm Badr (Sudan) nach einer geomorphologischen Karte aus JÄKEL & RÜCKERT (1998). Aus Gründen der besseren Sichtbarkeit sind nicht alle Einzelformen der Originalkarte wiedergegeben. Überlagert sind die Ableitungen des Drainagenetzes aus ASTER und SRTM-3-Daten. (verändert nach BUBENZER ET AL. 2007b)

dieses Beispiels durch den Autor in einem Vortrag beim Arbeitskreis Wüstenränder in Rauschholzhausen.) und im Ausschnitt in Abbildung 5-2 wiedergegeben ist (in der Umsetzung sind nicht alle erfassten Geländeformen wiedergegeben). Die Region ist geprägt von pleistozänen Longitudinaldünen (Qoz), die bis zu 40 m mächtig von NNE nach SSW ziehen (JÄKEL & RÜCKERT 1998). Ziel des Einsatzes von digitalen Geländemodellen kann es nicht sein, die erstellte Karte, die hier im Maßstab 1:100.000 erzeugt wurde, nachzuempfinden, da sich viele Formen dieser Karte gar nicht mit Hilfe von digitalen Daten der vorliegenden Auflösung erfassen lassen, sondern nur im Gelände erfasst werden müssen.

Im vorliegenden Fall geht es darum, das erfasste Drainagenetz des ariden Raumes durch Modellierung nachzuempfinden. Abbildung 5-2 zeigt, dass beide Modelle dieses Drainagenetz sehr gut erfassen. An vielen Stellen ist das ASTER-Modell jedoch detaillierter als das SRTM-3-Modell, was auf die höhere Auflösung zurückzuführen ist, wobei auch hier einige zweifelhafte Teilbereiche zu erkennen sind. Es zeigt sich jedoch, dass das Gesamtnetz prinzipiell gut wiedergegeben wird und einen sehr guten Überblick über die theoretischen Drainagevorgänge der Landschaft gibt.

5.3 Kunene-Region (Namibia)

Die Kunene-Region an der Grenze zu Angola (vgl. Abb. 5-3) ist ein Savannengebiet, in dem das als Pastoralnomaden wirtschaftende Volk der Himba lebt, die ein auf Erfahrungen beruhendes Weidemanagement betreiben, das das vorherrschende hochvariable Klima des semiariden Raumes berücksichtigt (SCHULTE 2002, BOLLIG 2006). Auf Grundlage der in Geländearbeit herausgearbeiteten Weidemanagement-Vorschriften ist eine Abhängigkeit der Weidetypen ausgehend von Geländehöhe, Hangneigung und Drainagesystem abgeleitet worden (Tab. 5-2).

Die daraus resultierende Kalkulation (Abb. 5-3) kann zunächst auf ihre Plausibilität hin mit den Geländebefunden überprüft werden und dann Hinweise auf die Flächenverteilung der einzelnen Weidetypen geben.

Diese erste Studie hat gezeigt, dass die Vorhersagewahrscheinlichkeit einen bestimmten Weidetyp in der Landschaft anzutreffen sehr hoch ist und eine Flächenkalkulation

Tab. 5-2: Klassengrenzen zu den einzelnen Weidemanagementtypen abgeleitet aus Geländebefunden. (verändert nach LINSTÄDTER & BOLTEN 2006)

Typ	Parameter	
	primär	sekundär
Regenzeit- weide	Drainage < 1000 m	Hangneigung < 9°
R		Höhe < 1285 m
Keine Weide möglich	Höhe > 1600 m	
U		Hangneigung > 15°
Notzeit- weide	Höhe < 1600 m	
E		Hangneigung > 9° - < 15°
Trocken- zeitweide	Drainage > 1000 m	nicht E Hangneigung < 15°
D		

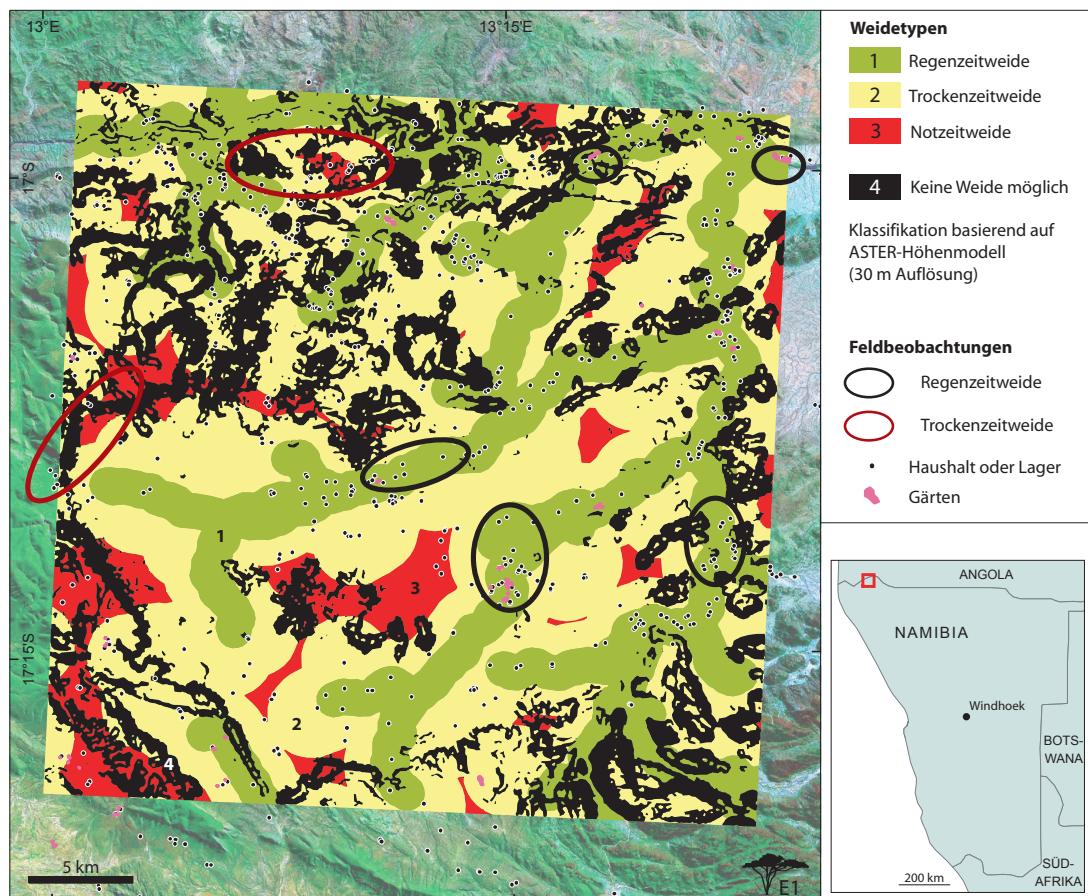


Abb. 5-3: Klassifikation der Landschaft in der Kunene-Region in Weidetypen ausgehen von einem ASTER-Höhenmodell. Die Grenzberechnung geht von den in Tab. 5-2 aufgestellten regeln aus. Die grundsätzlich richtige Klassifikation weist zum einen durch Probleme mit dem Höhenmodell und zum anderen durch die genutzten Algorithmen Problemregionen auf. Im Nordosten ist ein linearer Bereich („Keine Weide möglich“) durch ein Artefakt des Höhenmodells falsch zugeordnet. Die durch den Typ „Keine Weide möglich“ umschlossenen Gebiete (im Hochland über 1600 m; s. Tab. 5-2) sollten ebenfalls diesem Typ zugeordnet werden. (verändert nach LINSTÄDTER & BOLTEN 2006)

auf Basis des Höhenmodells möglich ist (LINSTÄDTER & BOLTER 2006). Eine Optimierung der Grenzen der Weidetypen ist jedoch nötig, um einige offensichtlich falsch klassifizierte Gebiete zu korrigieren (vgl. Abb. 5-3). Das Beispiel zeigt die mögliche Ableitung von Hinweisen zum aktuellen Nutzungspotential der Landschaft für die Himba allein aus geomorphometrischen Reliefparametern.

5.4 Abu Tartur (Ägypten)

Das Abu Tartur Plateau liegt zwischen den Oasen Dakhla und Kharga und bildet den südlichsten Punkt des Kalksteinplateaus der Western Desert (Anhang I, Abb. 5-4 und 5-5).



Abb. 5-4: Das Schichtstufe des Kalksteinplateaus fotografiert von der Oase Dakhla in nordöstlicher Richtung. (eigene Aufnahme im März 2000)

Das Plateau erstreckt sich ca. 50 km in West-Ost-Richtung und bildet im Süden eine 300-400 m hohe Schichtstufe aus. Die absolute Höhe liegt bei etwa 500-600 m ü. N.N. und überragt damit die relativ flachen Gebiete des südlichen Vorlandes (BROOKES 1993, EMBABI 2004).

Der Stufenbildner besteht aus resistenten marinen Mergeln, mergeligem Kalkstein und Dolomit und gehört zur paläozänen Kurkur Formation. Der Sockelbildner besteht aus weicheren paläozänen und oberkretazischen marinen Schiefern der Dakhla Formation, mit phosphatischen Einlagerungen, glaukonischem Sandstein und Schiefern der Duwi Formation sowie aus Schiefern und Sandstein der Taref Formation (SAID

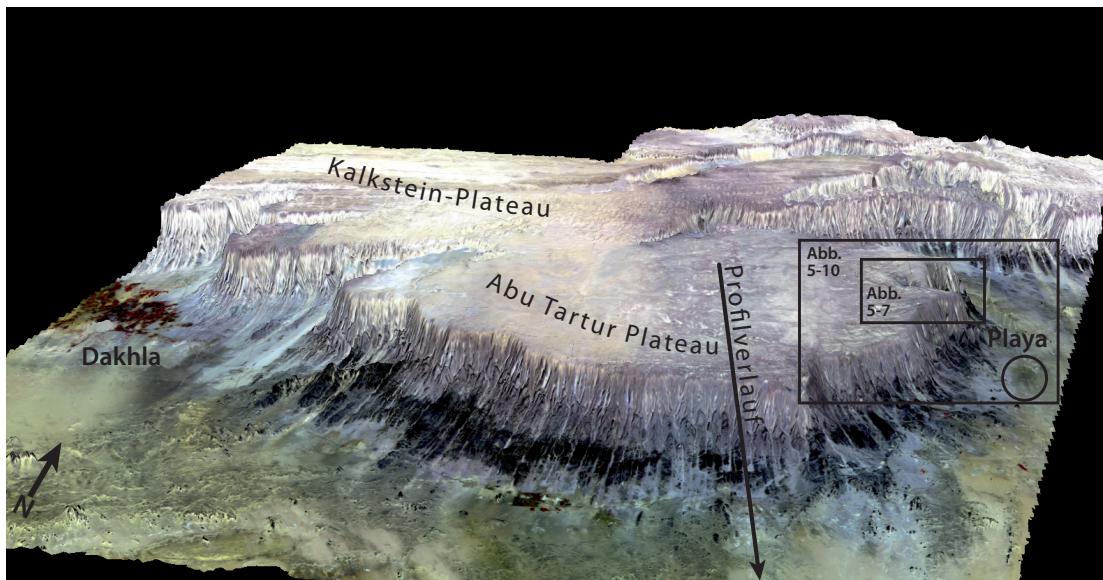


Abb. 5-5: Das Abu Tartur Plateau in einer 3D-Ansicht. Gut zu erkennen sind die Schichtstufe und im Westen ein Teil der vorgelagerten Oase Dakhla. Das Plateau umfasst ca. 50 km in West-Ost-Richtung. (Modell generiert aus der Überlagerung eines ASTER-Bildes mit den Kanälen 3n,2,1 – R,G,B über das entsprechende Höhenmodell mit starker Überhöhung. (eigener Entwurf)

1990, s.a. Abb. 6-3 und für einen groben Überblick Abb. 3-5). Eine untersuchte Playa (BUBENZER ET AL. 2007c) im Stufenvorland (vgl. Abb. 5-5) liegt in der oberkretazischen Maghrabi Formation, die aus Sand- und Tonstein besteht. Die Hauptverwerfungslinien verlaufen in SSW-NNE, S-N und WNW-ESE-Richtung (KLITZSCH ET AL. 1987).

Vorhandene ‚no-data‘-Bereiche im SRTM-3-Modell (vgl. Kap. 4.2.2.4) wurden mit den benachbarten Höheninformationen interpoliert, da es sich hier nur um einzelne nicht zusammenhängende Pixel handelt.

Abbildung 5-6 zeigt ähnlich Abbildung 5-1 einen Profilvergleich der beiden Modelle. Der Profilverlauf ist in Abbildung 5-5 eingezeichnet und verläuft in NW-SE-Richtung über die Schichtstufe bis in das Vorland.

Auffällig ist zunächst die gute Übereinstimmung der Daten im Stufenbereich, dann aber die Überschätzung der Höhenwerte auf dem Plateau und Unterschätzung der Höhenwerte des Vorlandes im ASTER-Modell. Für diese Tatsache gibt es zwei mögliche Erklärungen: Zum einen könnte aufgrund der dreifach geringeren Auflösung der SRTM-3-Daten dieses Modell stärker geglättet sein und so die Maximalwerte des Plateaus nicht erreicht werden. Zum anderen besteht die Möglichkeit einer Falschkalibration der ASTER-Daten, da hierzu nur die Satellitenorbitdaten genutzt wurden. Tatsache ist, dass der Detailreichtum der ASTER-Daten höher ist und die absolute Höhe auf dem Plateau der Wirklichkeit eher entspricht, da Höhen-Messungen mittels

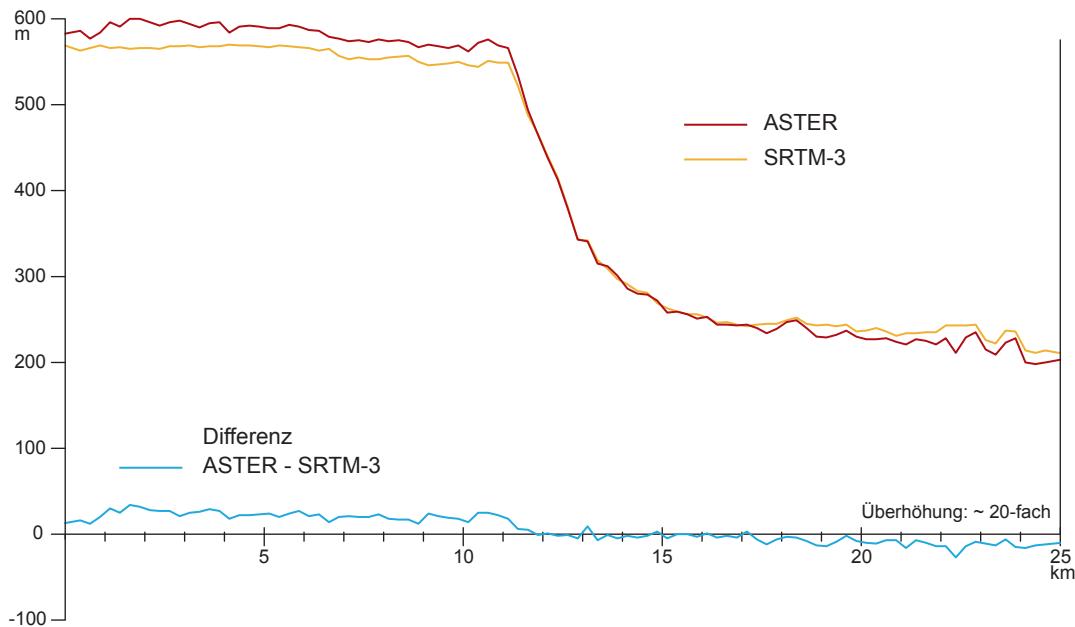


Abb. 5-6: Profilverlauf der Höhenmodelle ASTER und SRTM-3 am Abu Tartur-Plateau. Der Profilverlauf ist in Abb. 5-5 eingezeichnet. Weitere Informationen im Text. (verändert nach BOLTEN & BUBENZER 2006)

GPS Werte von über 600 m auf dem Plateau zeigen (SFB-Fahrtenbuch vgl. Kap. 4.1.3).

Das SRTM-3-Modell bleibt hier mit 570 m deutlich darunter.

Eine weitere Möglichkeit zur Bewertung und zum Vergleich digitaler Geländemodelle ist die Ableitung geomorphometrischer Parameter und deren Vergleich (SCHMIDT & DIKAU 1999, WILSON & GALLANT 2000; vgl. Kap. 5.2). Im vorliegenden Fall werden die Hangneigung und das hypothetische Drainagenetz genutzt. Die abgeleiteten Parameter können verglichen und für geomorphologische und geoarchäologische Fragestellungen genutzt werden. Abbildung 5-7 zeigt neben dem Satellitenbild die Hangneigungskarte für beide Modelle. Deutlich erkennbar ist zunächst die stark unterschiedliche Auflösung der Modelle. Nichtsdestotrotz ist die Stufenkante in beiden Modellen sehr gut erkennbar, obwohl im SRTM-3-Modell die höchste Hangneigungsklasse für die Stufenkante nicht durchgängig besetzt ist. Das ASTER-Modell gibt hier einen realistischeren Eindruck. Der in Abbildung 5-7a markierte Zeugenberg wird bspw. im ASTER-Modell komplett wiedergegeben, im SRTM-3 Modell erscheint er an der Westseite nicht so steil abzufallen. Ebenfalls im ASTER-Modell besser wiedergegeben sind die linearen Strukturen auf dem Plateau im Südwesten des Bildes, die, am Schattenwurf des Satellitenbildes erkennbar, unterschiedliche Höhen aufweisen.

Ein weiterer Parameter ist das hypothetische Drainagenetz, das für beide Modelle in Abbildung 5-8 dargestellt ist. Erkennbar ist die gute Übereinstimmung für beide

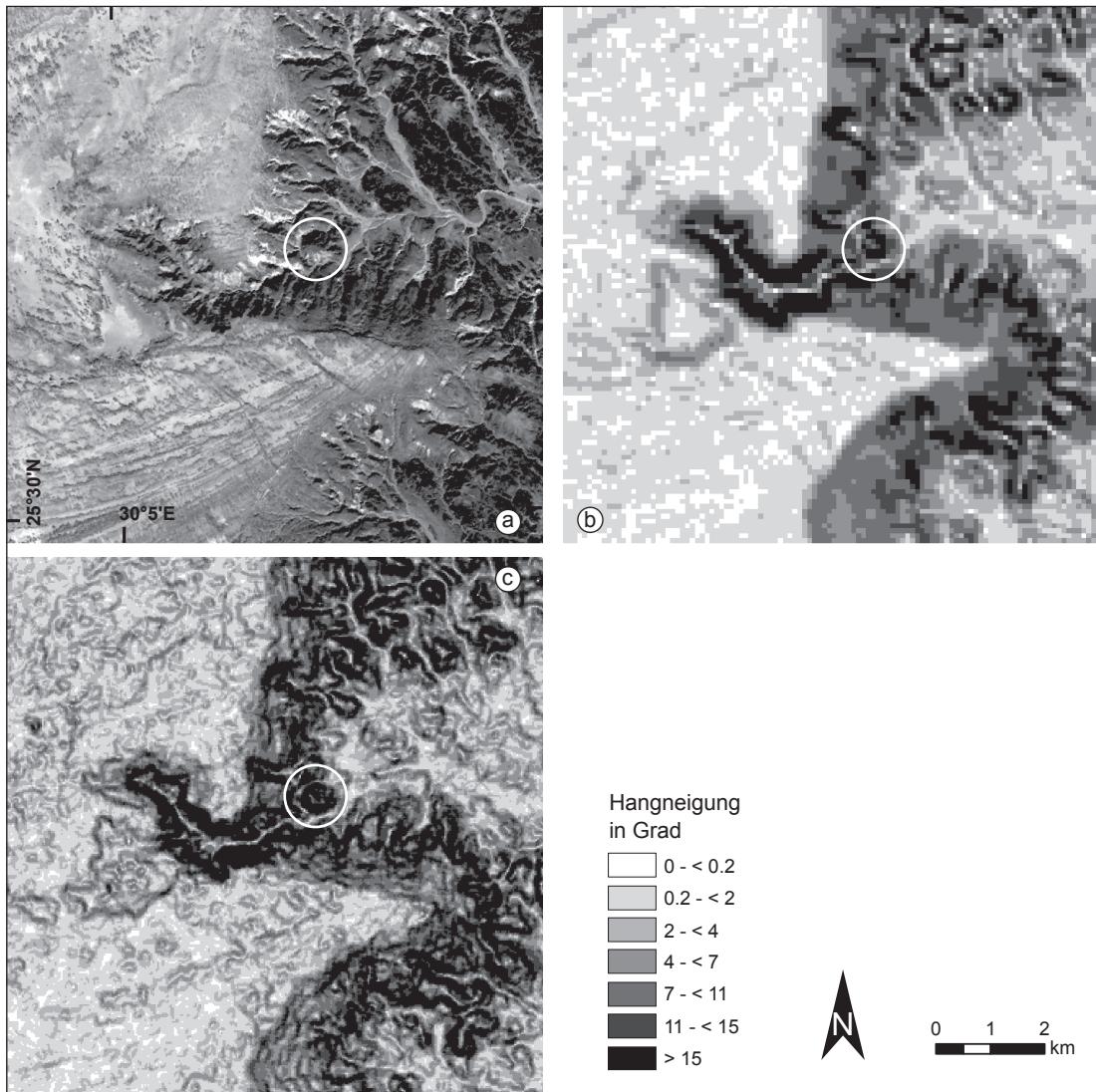


Abb. 5-7: Ausschnitt des Abu Tartur Plateaus (Region ist markiert in Abb. 5-5). (verändert nach BOLTEN & BUBENZER 2006)

Modelle auch mit den visuellen Informationen aus dem Satellitenbild. Der größere Detailreichtum des aus ASTER-Daten abgeleiteten Modells erklärt sich mit der höheren Auflösung. Das Plateau selbst zeigt weder visuell noch in den Modellen ein stark ausgeprägtes Drainagenetz (die Linien verlaufen relativ gerade radial nach außen zur Stufenkante). Dies deutet darauf hin, dass der meiste Abfluss in früheren Feuchtphasen (im Tertiär und Pleistozän) unterirdisch in einem karsthydrographischen System stattgefunden hat (vgl. EMBABI 2004, BOLTEN & BUBENZER 2006). Abbildung 5-9 zeigt die in Abbildung 5-8 markierte Detailregion. In diesem Bereich weichen die beiden Modellberechnungen stark voneinander ab. In der Abbildung ist neben den Drainagenetzen auch das ASTER-Höhenmodell in Höhenschichten abgebildet. Erkennbar ist, dass die Höhe nur um wenige Dekameter in diesem Bereich schwankt.

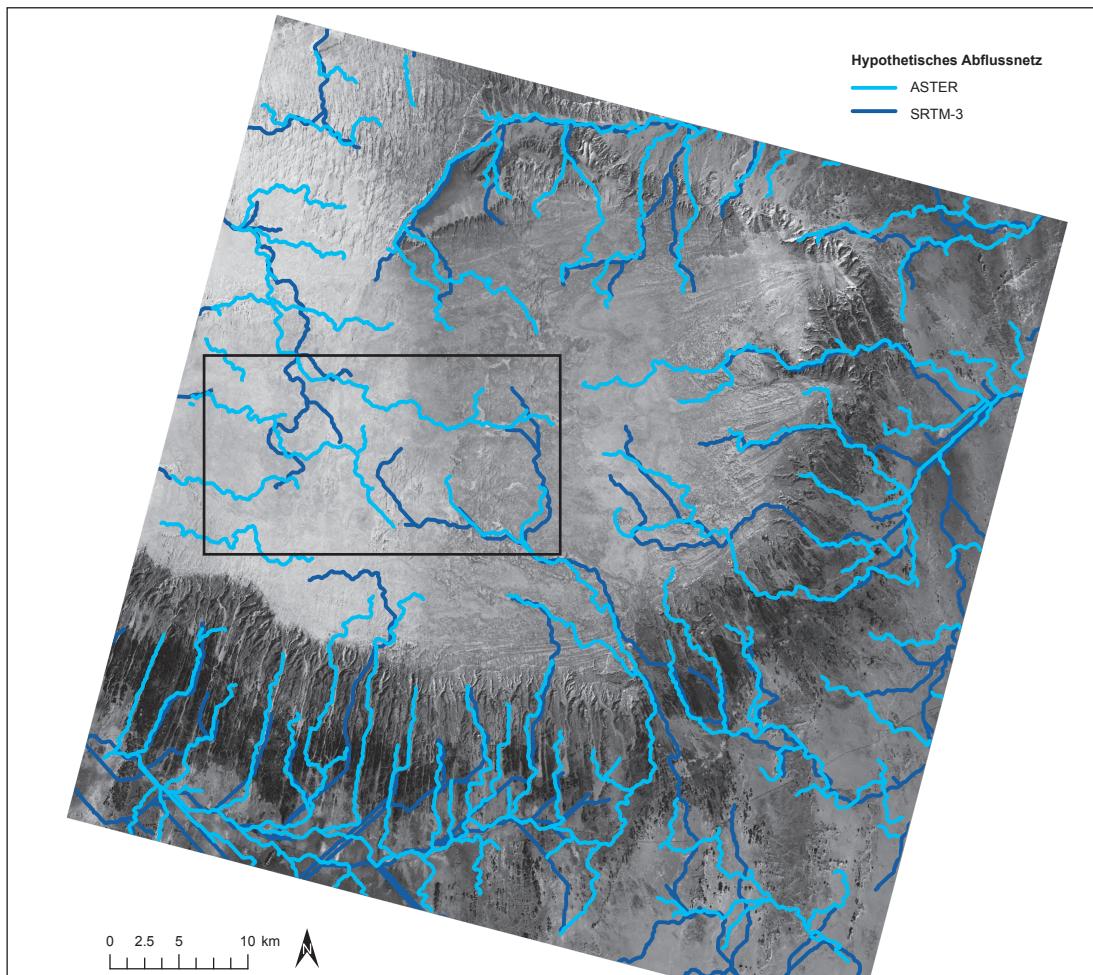


Abb. 5-8: Hypothetisches Drainagenetz eines Teilbereiches des Abu Tartur Plateaus ermittelt aus beiden Höhenmodellen. Gut zu erkennen sind die prinzipielle Übereinstimmung beider Modelle, aber auch die großen Unterschiede im sehr flachen Bereich des Plateaus (in der Abbildung im markierten Bereich). Die beiden Höhenmodelle zeigen hier grundsätzliche Unterschiede (der markierte Bereich ist in Abbildung 5-9 dargestellt). (verändert nach BOLTEN & BUBENZER 2006)

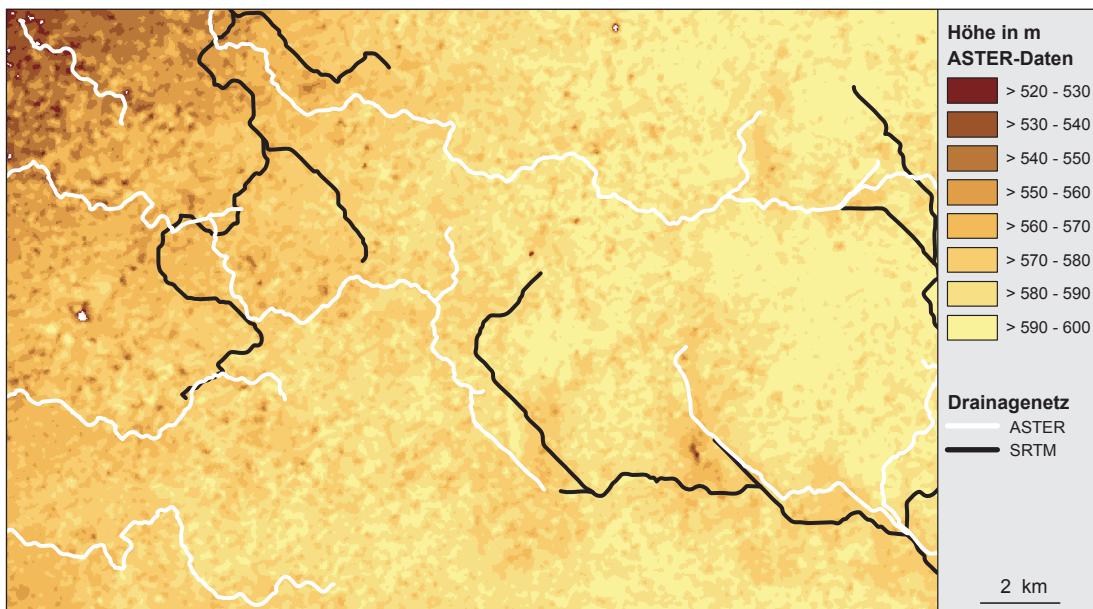


Abb. 5-9: Detailregion aus Abbildung 5-8. Dargestellt sind Höhenschichten der Region aus dem ASTER-Höhenmodell. Deutlich ist zu erkennen, dass das Gebiet nur einen geringen Höhenunterschied aufweist (Für das Gebiet ergibt sich eine durchschnittliche Hangneigung von nur etwa $0,13^\circ$), der dazu führt, dass aufgrund der Unterschiede der Modelle innerhalb ihrer Fehlertoleranzen die Ableitung zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können. (eigener Entwurf)

Ausgehend von den Abmessungen und der Reliefenergie, die in der Karte dargestellt sind, ergibt sich nur eine durchschnittliche Hangneigung von etwa $0,13^\circ$. Mit diesem Beispiel wird deutlich, dass gerade in flachen Regionen geringe Höhenabweichungen in den Modellen zu völlig anderen Abflussberechnungen führen können. Bei der Interpretation der Daten ist damit abzuwegen zwischen der Genauigkeit der Berechnung einer Abflussbahn und der zugrundeliegenden Reliefenergie.

Geomorphologische und geoarchäologische Untersuchungen in der Region Abu Taratur haben gezeigt (BUBENZER ET AL. 2007c), dass – wie auch in anderen Regionen der Western Desert – archäologische Fundplätze für gewöhnlich in Zusammenhang mit potentiellen Abflusslinien und Depressionen gefunden werden können (BUBENZER & HILGERS 2003, BOLTEN ET AL. 2006, BUBENZER ET AL. 2007c). Die im Untersuchungsgebiet liegende Playa weist ebenfalls eine große Anzahl archäologischer Fundplätze auf (RIEMER ET AL. 2004; Abb. 5-10). Während des Holozäns war die Playa zeitweise mit Wasser gefüllt, und es war möglich, dass eine Jäger- und Sammlergesellschaft in diesem semiariden Raum zumindest zeitweise leben konnten. Datierungen an Holzkohlefunden stützen diese Hypothesen (BUBENZER ET AL. 2007c). Abbildung 5-10 zeigt die Größe des Einzugsgebietes der Playa und somit die potentielle Wassermenge, die den zeitweise vorhandenen See gespeist hat. Das gesamte Drainagesystem wird dabei sicher nicht vollständig aktiv gewesen sein, jedoch bietet die Größe des Einzugsgebietes eine potentiell höhere Wahrscheinlichkeit, dass Wasser den Bereich der Playa erreichen kann.

Abbildung 5-11 zeigt einen Detailausschnitt der Region, die in Abbildung 5-10 markiert ist. Die Region zeigt deutlich den durch fluviale Erosion geprägten Raum des Wadis. Untersuchungen vor Ort haben gezeigt, dass hier eine junge Aktivität vorliegen muss. Zum einen erscheinen die steilen Flanken des Wadis sehr frisch (auch im hochauflösten QuickBird-Satellitenbild sind die Flanken durch ihren Schattenwurf gut zu erkennen. Zum anderen wird das Wadi durch eine Karawanenroute gekreuzt (im Bild nicht zu erkennen), die im Wadi durch Sediment abgedeckt ist. Somit muss mindestens einmal nach der Zeit des Karawanenhandels das Wadi so stark abgekommen sein, dass diese Spuren ausgelöscht wurden (pers. Mitteilung Prof. Bubenzer am 9. 11. 2007).

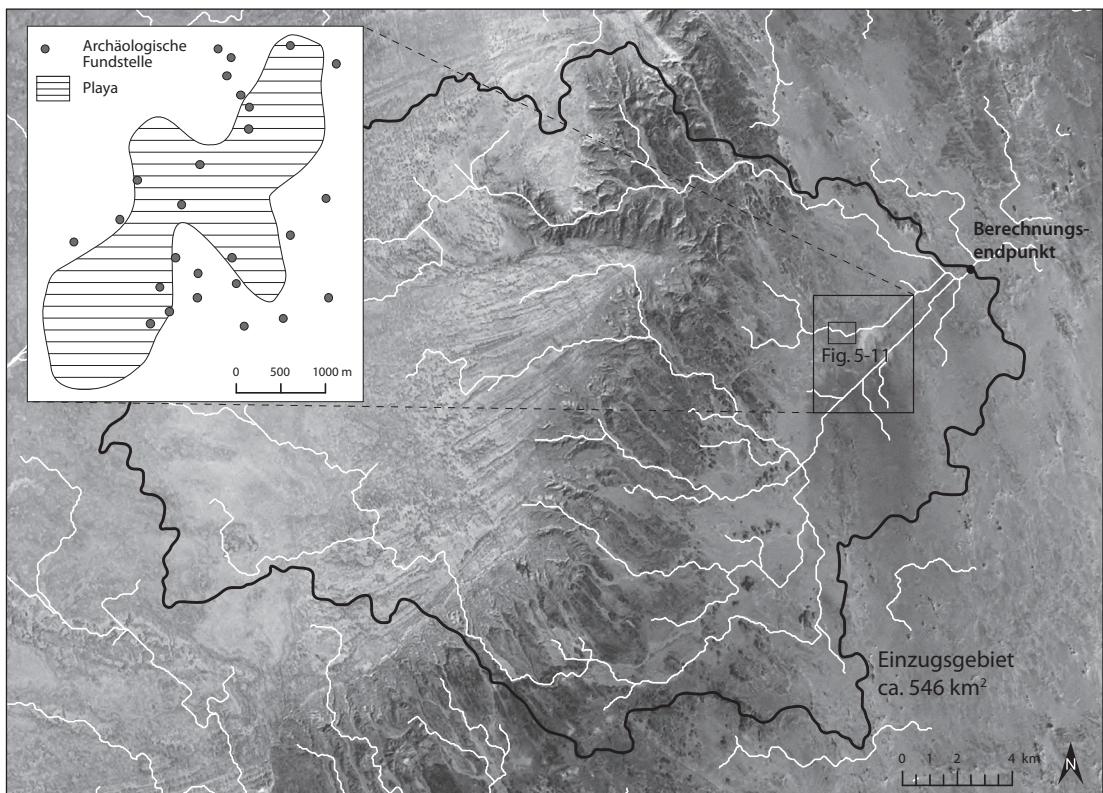


Abb. 5-10: Das berechnete Einzugsgebiet für die Playaregion im östlichen Vorland des Plateaus. Im Bereich der Playa lassen sich eine große Anzahl von Fundplätzen finden (BUBENZER ET AL. 2007c). (verändert nach BOLTEN & BUBENZER 2006)

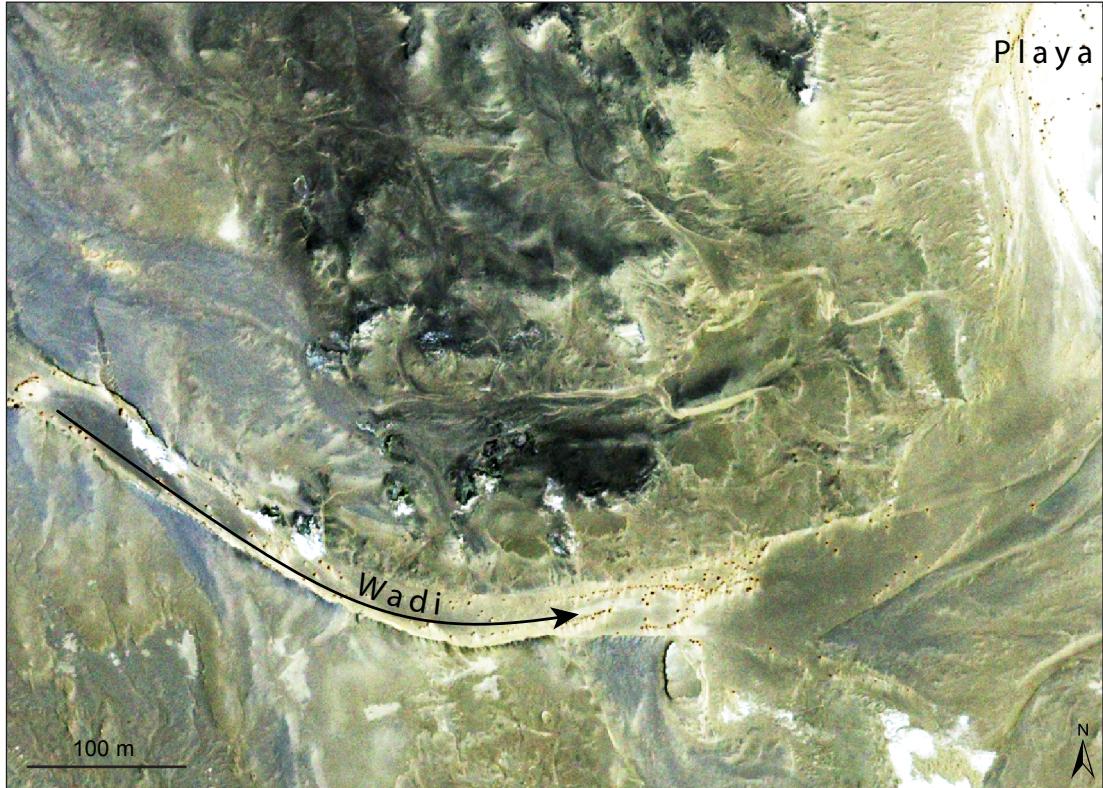


Abb. 5-11: Das Satellitenbild zeigt einen kleinen Ausschnitt aus dem Vorland des Abu Tartur Plateaus (markiert in Abb. 5-10). Gut zu erkennen ist das Wadi, dass auch im heutigen hyperariden Klima zeitweise aktiv ist, vor dem Eintritt in die Endpfanne mit den Playasedimenten. Weitere Indizien sind die Vegetation die am rechten oberen Bildrand zu erkennen ist und die sich verdichtet nach NE fortsetzt. (eigener Entwurf)

Die Untersuchung Abu Tartur zeigt die tatsächliche Einsatzmöglichkeiten der beiden Höhenmodelle, wobei deutlich wird, dass aufgrund der Auflösung ASTER-Höhenmodelle bei Untersuchungen in diesem Maßstabsbereich (1:100.000 und größer) deutliche Vorteile gegenüber SRTM-3-Daten haben.

5.5 Große Sandsee (Ägypten)

Die Sandseen oder Ergs enthalten alle mehr oder weniger große Dünengebiete (WILSON 1973, MCKEE 1979). Die in ihnen vorkommenden Dünen unterscheiden sich in Größe, Abstand, Aufbau, Farbe und Korngröße (LANCASTER 1999). Für die Entwicklung der Sandseen sind voneinander getrennte Phasen nötig, die den Aufbau, die Stabilisation und das Sedimentrecycling umfassen (WERNER 1999, KOCUREK & EWING 2005). Pleistozäne Megadünen (Draa) mit aufsitzenden holozänen Dünen sind in den Ergs weit verbreitet. Aufgrund der schwierigen Erreichbarkeit und Erfassung der Gebiete existieren für die meisten Ergs der Erde nur wenige topographische Karten in großem Maßstab. Es wird zunehmend deutlich, dass die Fernerkundung exzellente Möglichkeiten bietet, flächenhafte Informationen über diese Gebiete auch in großem Maßstab zu erhalten. Gerade neue, höher aufgelöste Geländemodelle der letzten Jahre können für verschiedene Fragestellung aus der Geomorphologie und Geoarchäologie hilfreich sein (BLUMBERG 2006, BOLTON & BUBENZER 2006). So sind Fragestellungen zur Wasserspeicherfähigkeit und -bereitstellung durch Dünen im Holozän oder in heutiger Zeit zu nennen (s. Abb. 5-14 und Kap. 5.5.3), um bspw. die Genese der Playa-vorkommen in Teilen der Gassen der südlichen Großen Sandsee zu untersuchen.

In diesem Kapitel soll zunächst die Genese der Draa und Dünen in der Großen Sandsee mit Hilfe eines Modells erläutert werden. Darüber hinaus soll der Fragestellung nachgegangen werden inwieweit mit vorhandenen digitalen Geländemodellen aus ASTER- und SRTM-3-Daten quantitative geomorphologische Untersuchungen über Draa und die Unterscheidung von Draa und Dünen möglich sind. Feldstudien dazu sind im Rahmen des SFB 389 vielfältig in vier Transsektten durch die Große Sandsee zwischen 1996 und 2006 durchgeführt worden (z.B. BESLER 1997, 2000, 2002, 2006, in press, BUBENZER ET AL. 2007d, BUBENZER & BOLTON in press a). Daneben sind im Jahre 2004 Vergleichsuntersuchungen in der Wüste Namib in Namibia durchgeführt

worden, die – durch OSL-Datierungen gestützt – eine synchrone pleistozäne Draa-Entwicklung unter vergleichbaren Windverhältnissen zeigen (BUBENZER ET AL. 2006). Diese Vermutung wird auch von anderen Untersuchungen gestützt (z.B. EITEL ET AL. 2004, 2006).

5.5.1 Komplexe Dünenmuster

Typischerweise werden in Sandseen mehrere Formen von komplexen Dünenfeldern angetroffen. Nach KOCUREK & EWING (2005) liegt ein komplexes Dünenmuster dann vor, wenn Kleinformen über Großformen vorkommen, Großformen in einem Umstrukturierungsprozess begriffen sind oder wenn Großformen in umgearbeiteten Mustern zu erkennen sind. LANCASTER ET AL. (2002) zeigen dies bspw. für eine Region in Mauretanien (s. Abb. 5-12) und weisen drei unterschiedliche Dünenmuster nach, die sich zeitlich über OSL-Datierungen der Sande einteilen lassen: (1) 24–15 ka (LGM),

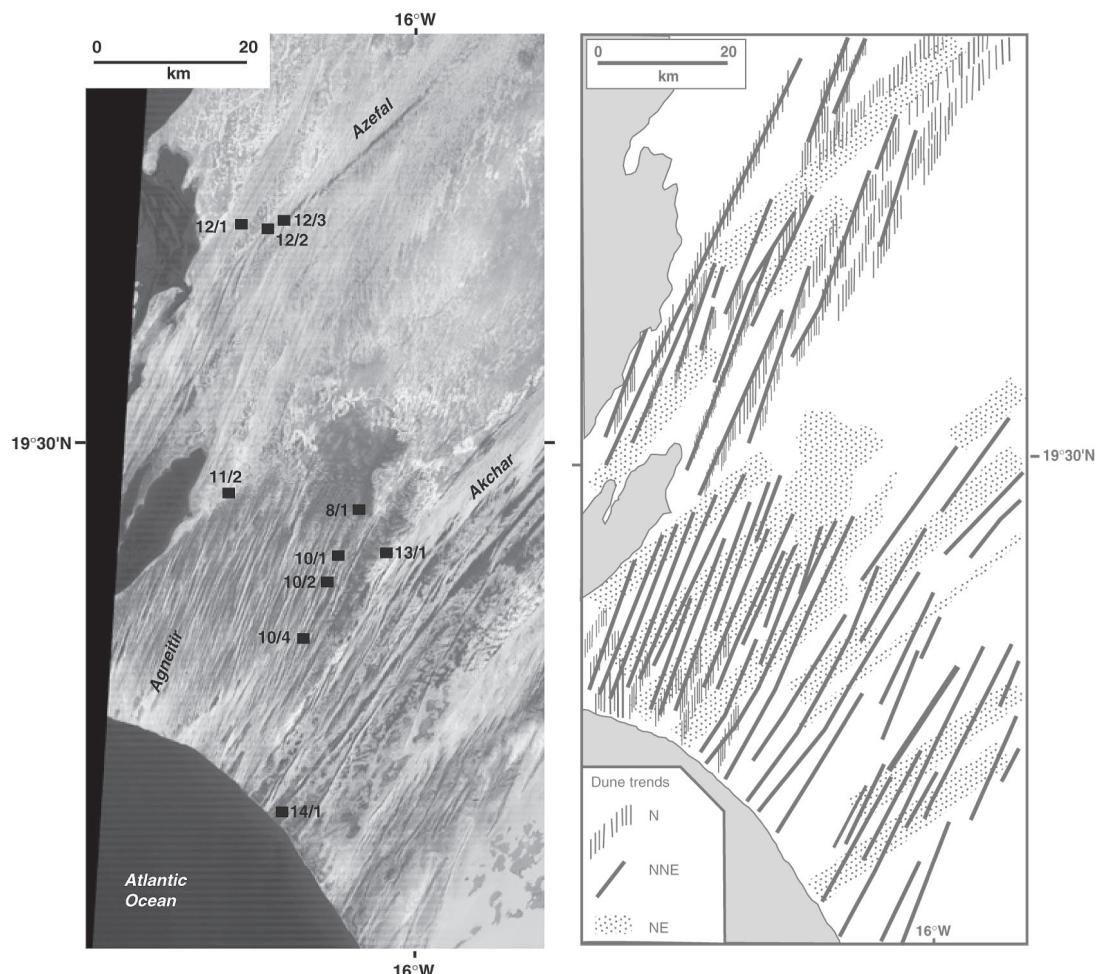


Abb. 5-12: Komplexes Dünenmuster in Mauretanien 100 km nördlich von Nouakchott. Im Satellitenbild (links) sind die drei verschiedenen Muster zu erkennen, die in der Umzeichnung (rechts) in ihre Streichrichtungen unterteilt wurden (LANCASTER ET AL. 2002).

(2) 13–10 ka (Jüngere Dryas) und (3) nach 5 ka (LANCASTER ET AL. 2002). Entsprechend der Streichrichtung der einzelnen Dünenmuster können so die vorherrschenden Windregime im Pleistozän und Holozän abgeleitet werden und indirekt Rückschlüsse auf die Klimaentwicklung geben. KOCUREK & EWING (2005) zeigen weitere Beispiele aus Dünengebieten in den USA und Mexiko und weisen mittels Computersimulationen die Beziehung zwischen Windregimeänderung und komplexen Dünenmustern nach.

5.5.2 Draa und Dünen – Aufbau und Charakteristik

Charakteristisch für die meisten Sandseen ist das Vorkommen von Längsdünen, so genannte Megadünen oder Draa (Abb. 5-13). Sie wurden während der hyperariden Phase der letzten Eiszeit aufgebaut, in der wesentlich höhere Windstärken – aufgrund des höheren Druckgradienten zwischen Pol und Äquator – vorherrschten (SARNTHEIM 1978, TSOAR 2001, LANCASTER ET AL. 2002). Normalerweise sind sie von holozänen Dünen überlagert, die bei bimodalen Windverhältnissen meist aus longitudinalen Dünen (Silk) und bei unimodalen Windverhältnissen meist aus Barchanen bestehen (z.B. WIGGS 2001, TSOAR 2001, MUNYIKWA 2005). Während die Genese der holozänen Dünen weitgehend verstanden ist, wird die Entstehung der longitudinalen Draa weiter diskutiert.

Nach dem heutigen Stand der Forschung ist aber nur eine Theorie in der Lage, alle beobachteten Phänomene widerspruchsfrei zu erklären (BESLER 1992): das Modell der

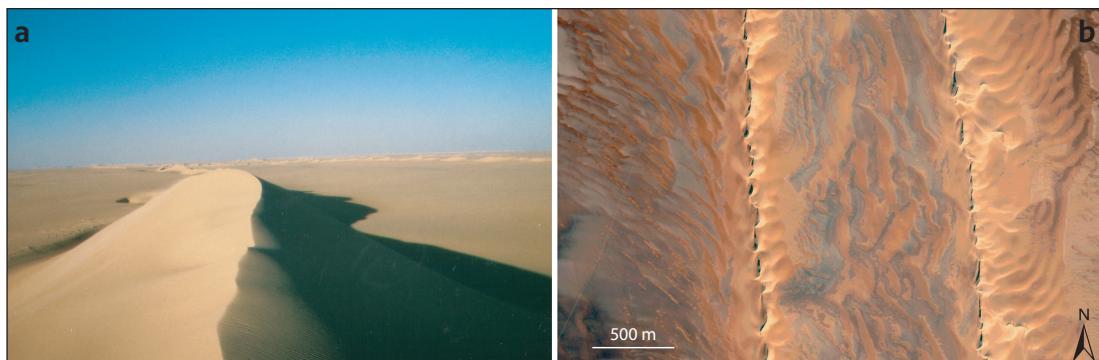


Abb. 5-13: (a) Dünenkamm einer Draa-Dünen-Kombination der Großen Sandsee. Am Horizont sind weitere Dünenzüge zu erkennen (eigene Aufnahme im März 2000). (b) Satellitenaufnahme einer anderen Region der Großen Sandsee mit vergleichbaren Longitudinaldünen. Gut zu erkennen sind die Kämme der Silk und im vorliegenden Bild die Autospur im westlichen Bereich. (Bild aus GoogleEarth entnommen)

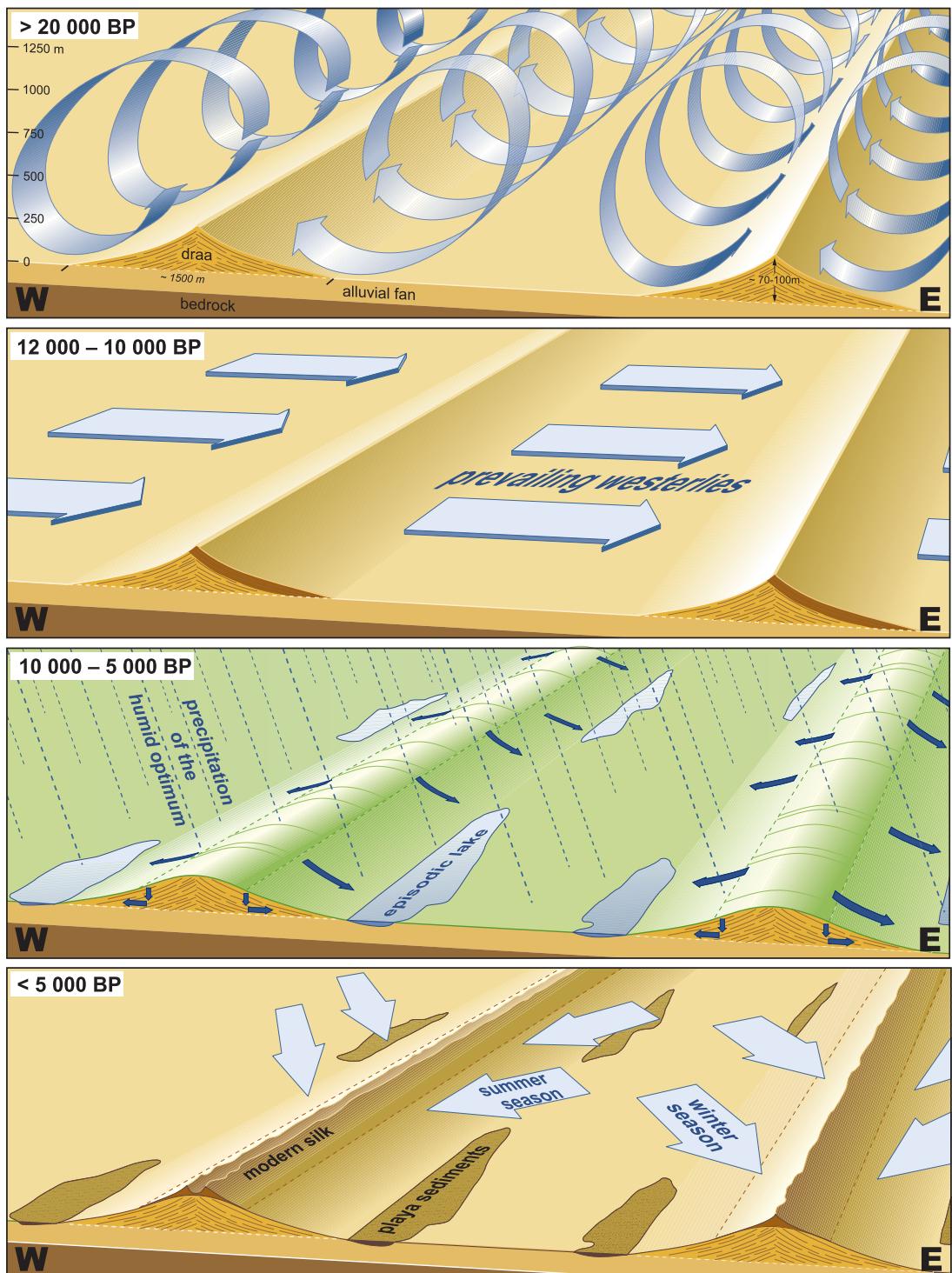


Abb. 5-14: Schematisches Modell der Windregime und Landschaftsentwicklung der südlichen Großen Sandsee (Ägypten) seit dem letzten glazialen Maximum (BUBENZER & BOLTON in press a).

- > 20.000 BP: Bildung der Megadünen (Draa) durch starke nördliche Winde, die als gegenläufige helikale Walzen innerhalb der planetarischen Grenzschicht wehen.
- 12.000-10.000 BP: Akkumulation des Sandes der östlichen Flanken der Draa aufgrund südwärts verschobener trockener Westwinde.
- 10.000-5.000 BP: Stabilisierung der Draa während des holozänen Optimums. Abfluss (Pfeile) und Deflation (während kurzer arider Phasen) flachen die Draa in breite Rücken ab. Oberflächenabfluss und Versickerung liefert Wasser für flache episodische oder saisonale Seen mit Playa-Sedimenten an der Draa-Basis.
- < 5.000 BP: Hyperaridität und ein bimodales Windregime mit nördlichen bis nordwestlichen Winden im Winter und nördlichen bis nordöstlichen Winden im Sommer reaktivieren den Draasand und formen die heutigen Longitudinaldünen (Silk).

Kartographie: Udo Beha

gegenläufigen Doppelhelix in der planetarischen Grenzschicht, auch Taylor-Görtler-Wirbel genannt (BESLER 1992). Demnach lässt sich die Genese entsprechend Abbildung 5-14 erklären (BUBENZER & BOLTEN in press a).

Aufgrund von Felduntersuchungen lassen sich im Gelände und mittels sedimentologischen und chronologischen Untersuchungen Draa und holozäne Dünen trennen. Im Folgenden sollen mit geomorphometrischen Untersuchungen von Höhenmodellen die Grenzregion zwischen Draa und sich durch die Passatwinde nach Süden fortsetzenden holozänen Silk untersucht werden. Ziel ist es, diese Grenzregion mittels Fernerkundungsdaten abschätzen zu können. Darüber hinaus wird gezeigt, wie eine Sandmassenbilanz durchgeführt werden kann.

In Abbildung 5-17a ist ein Bereich der südlichen Großen Sandsee im Übergangsreich zwischen Draa-Dünen-Komposit und der südlichen Verlängerung der holozänen Dünen abgebildet (vgl. Abb. 5-16). Ohne Feldaufenthalt ist allein mit Hilfe des Satellitenbildes nicht zu erkennen, an welcher Stelle die Draa aufhört und nur die holozäne Silk weiter südwärts verläuft.

Abbildung 5-17b zeigt eine Hangneigungskarte des Gebietes abgeleitet aus SRTM-3-Daten. Erkennbar sind einzelne lineare Elemente. Die maximale Hangneigung liegt hier bei etwa $10,5^\circ$. Dieser Wert ist – auch mit eigenen Felderfahrungen aus dem Jahre 2000 in der westlichen Großen Sandsee – wesentlich zu klein (Abbildung 5-15 illustriert die Hangneigung an einer Draa). Dies hängt mit der geringen Auflösung von 90 m zusammen, die dazu führt, dass die Draa zu flach dargestellt werden, da die mittlere Höhe unterschätzt wird und dadurch die Hangneigung zu gering ausfällt. Das ASTER-Modell (Abb. 5-17c) zeigt realistischere Werte, die auch mit den Felduntersuchungen (markiert in Abbildung 5-17a) gut übereinstimmen. Aufgrund der höheren Auflösung sind im nördlichen Bereich der Karte deutlich zwei Flanken mit einem flachen Bereich dazwischen zu erkennen. Das Profil gibt deutlich die Form und Dimension eines Querprofils einer Longitudinaldraa wieder. Auch die maximale Hangneigung mit 32° entspricht eher der Realität. Bemerkenswert ist, dass im Bereich der Übergangszone zwischen Draa und der nach Süden weiterlaufenden holozänen Dünen die lineare Ausprägung der Flanken nicht mehr im Hangneigungsbild zu erkennen ist.

Aufgrund dieser Daten ist es möglich, das Südende der Draa zu bestimmen und somit im Vergleich mit dem Satellitenbild die Verlagerungsentfernung der Silk nach Süden zu messen. Bei der untersuchten Draa-Dünen-Kombination beträgt die Südverlängerung etwas 4 km. Nach Norden können die Draa verfolgt werden, bis die

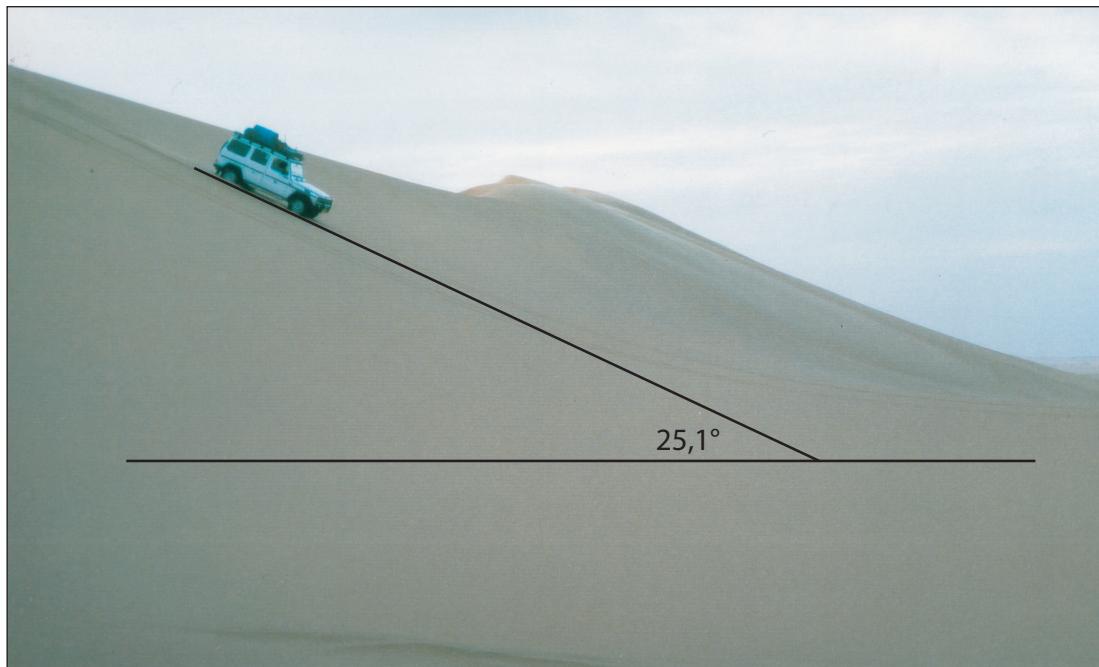


Abb. 5-15: Abfahrt an der Ostflanke einer Draa im mittleren Teil der Großen Sandsee bei etwa 25°N mit ungefährer Neigungsbestimmung von mehr als 25°. (eigene Aufnahme im März 2000)



Abb. 5-16: Ende einer holozänen Longitudinaldüne in der südlichen Großen Sandsee. Draa mit Silk sind am Horizont zu erkennen. Frau Prof. Besler als Größenvergleich. Die Autospuren auf der Hamma-da-Fläche zeigen den enormen Erhaltungsgrad (der viele Jahrzehnte umfassen kann) der extrem selten vorbeifahrenden Fahrzeuge. (eigene Aufnahme im März 2000)

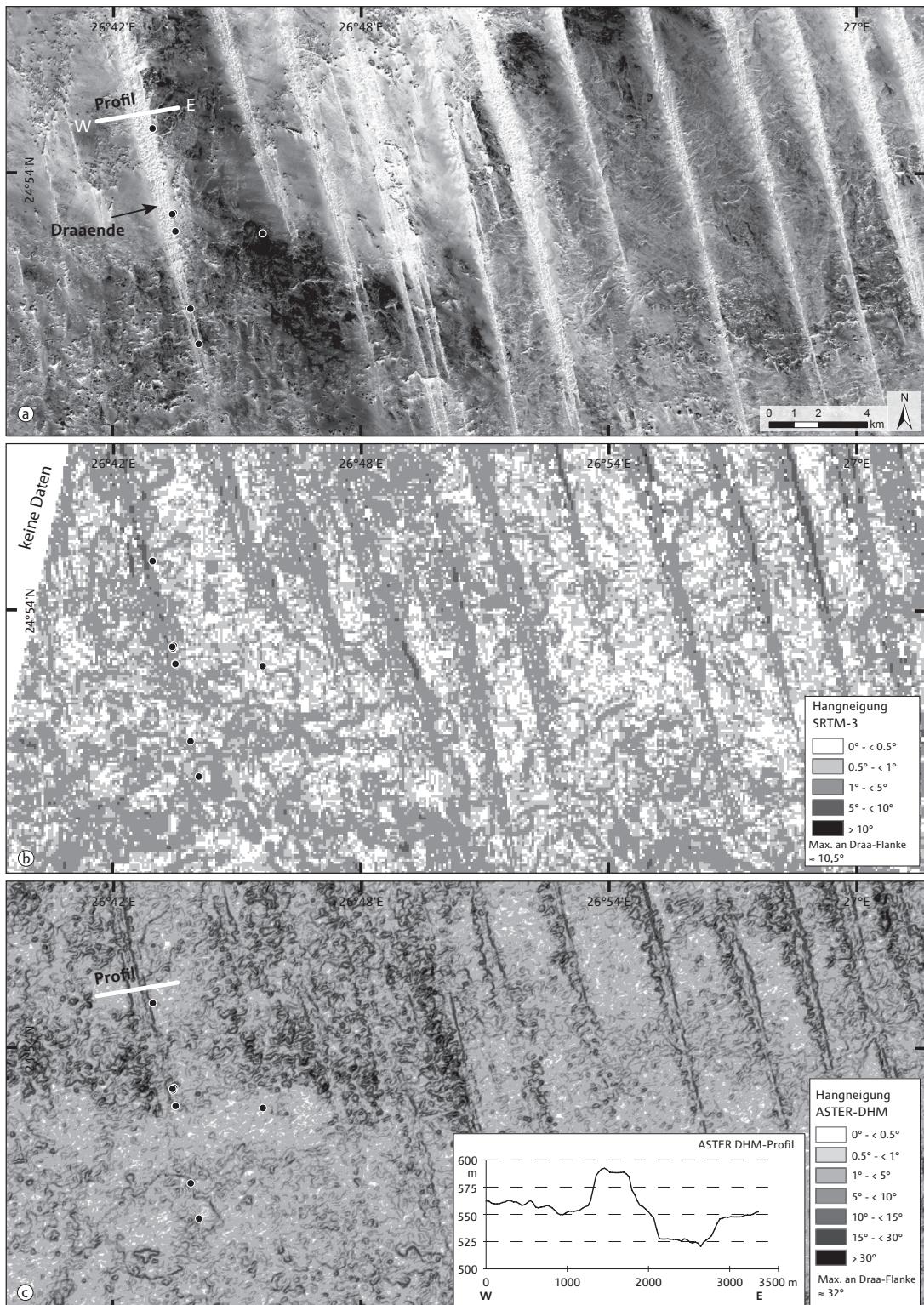


Abb. 5-17: Überblick über einen Teil der südlichen Großen Sandsee (verändert nach BUBENZER & BOLLEN in press a). (a) ASTER-Kanal 3n, der in Graustufen den Bereich wiedergibt. Deutlich sind die auslaufenden Longitudinaldünen und die dazwischen liegenden Gassen zu erkennen. Die Punkte geben Untersuchungsstellen des SFB 389 (TP A1) wieder und der Pfeil markiert den südlichsten Punkt der Draa. (b) Hangneigungskarte desselben Gebietes aus SRTM-3-Daten. (c) Hangneigungskarte desselben Gebietes aus ASTER-Höhendaten. Weitere Informationen im Text.

Gassen zwischen den Draa so versandet sind, dass die Höhe der Draa nicht mehr ausreicht, um bei gegebener Auflösung einen genügend großen Höhenunterschied für eine Hangneigungskarte ableiten zu können.

Bei Vergleichsuntersuchungen in der Namib (Abb. 5-18/19) und der darauf folgenden Untersuchung dieses Gebiets mit Hilfe von ASTER-Daten zeigt sich die oben angesprochene Höhen-Problematik (BUBENZER & BOLLEN in press a). Im vorliegenden Gebiet (s. Abb. 5-18) erreichen die Draa nur eine Höhe von ca. 30 m (vgl. Profil in Abb. 5-19), im Gegensatz zu deutlich über 50 m in der Großen Sandsee (vgl. Profil in Abb. 5-17c). Die Längsdünen sind im Satellitenbild zwar deutlich zu erkennen, lassen sich im Hangneigungsbild jedoch nicht mehr eindeutig von den Gassen trennen.

BLUMBERG (2006) zeigt zwar die Trennung von Draa und holozänen Dünen in der Namib. Dies jedoch weiter nördlich und mit anderen Daten. Er vergleicht

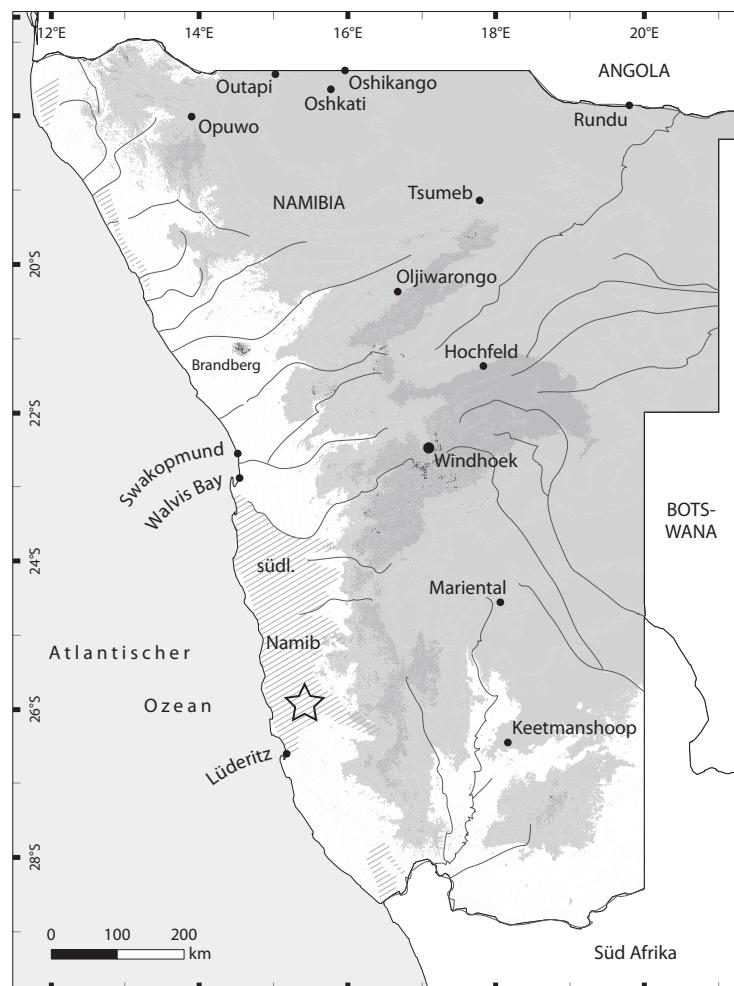


Abb. 5-18: Vergleichsgebiet (mit Stern markiert) in der südlichen Namib (Namibia). (eigener Entwurf)

SRTM-X- und SRTM-C-Daten (vgl. Kap. 4.2.2.4) und zeigt zunächst, dass die C-Band-Daten mit ~ 90 m Auflösung nicht imstande sind, die beiden Dünentypen zu trennen. Die SRTM-X-Daten haben mit 30 m dieselbe Auflösung wie ASTER-Daten, stehen jedoch weder kostenfrei noch flächendeckend zur Verfügung, scheinen aber (wenn-gleich für diese Region nicht geprüft) einen geringen vertikalen Fehler aufzuweisen. Leider ist das Gebiet in BLUMBERG (2006) nicht genau angegeben, sodass ein Vergleich mit ASTER-Daten nicht möglich ist.

Deutlich wird, dass das ASTER-Modell mit 30 m Auflösung und der vorliegenden Qualität nicht in der Lage ist, für die südliche Namib Draa und Dünen voneinander zu trennen. Die Auflösung von 30 m bildet hier eine Auflösungsgrenze für eine Draahöhe von ungefähr 30 m. Für andere Ergs bietet sich hiermit die Möglichkeit, geomorphometrische Untersuchungen an Längsdünen entsprechender Dimension mit ASTER-Daten durchzuführen.

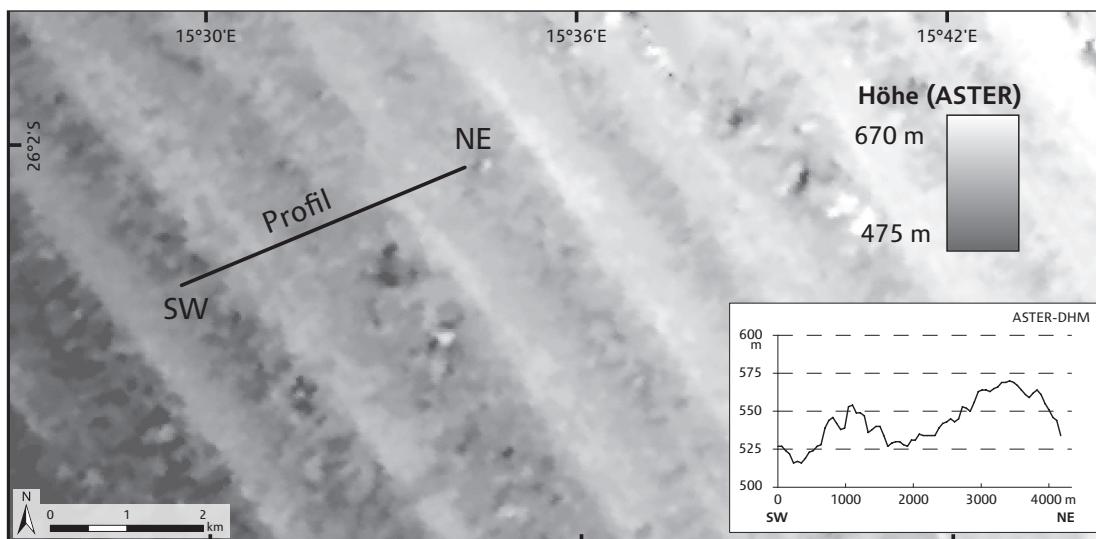


Abb. 5-19: ASTER-Höhenmodell aus dem Gebiet der südlichen Namib (Namibia). Im Profil ist die geringere Höhe der Draa erkennbar. Durch die starke Versandung der Gassen ist ein Trennen mit ASTER-Daten kaum möglich. (verändert nach BUBENZER & BOLTEN in press a)

5.5.3 Sandmassenabschätzung eines Draa-Abschnittes in der Großen Sandsee

Sandmassenabschätzungen dienen unterschiedlichen Fragestellungen als Untersuchungsmethode. So können über die Menge des Sandes mögliche Sandquellen und deren nötige Masse abgeschätzt werden. In der Diskussion über die Speicherungs-

möglichkeit von Wasser in Dünenkörpern spielt ebenfalls die Sandmasse, die als Speichermedium dient, eine Rolle.

Herkömmliche Methoden zur Abschätzung von Sandmassen von Längsdünen nutzen eine Prismenmodell, das in regelmäßigen Abständen mit Daten aus Felduntersuchungen abgestimmt wird (BESLER 2006). Der Einsatz eines genügend aufgelösten Geländemodells ist praktikabler und realistischer, da nicht nur an wenigen Stellen das *Prismenmodell* angepasst wird, sondern kontinuierlich – ausgehend von der Auflösung des Modells – das Volumen eines vorgesehenen Teilstücks aufintegriert werden kann. Abbildung 5-20 zeigt ein extrahiertes Draastück, wobei die Hanggrenzen mittels einer Hangneigungsberechnung (Neigung = 0°) kalkuliert wurden (vgl. Abb. 5-17c). Die Basis der Draa wurde als durchgehend flach angenommen. In Wirklichkeit ist der Untergrund unter einer Draa nicht bekannt. Es spricht aber wenig dafür, dass sich eine Aufwölbung oder Senke unter jeder einzelnen Longitudinaldüne befindet.

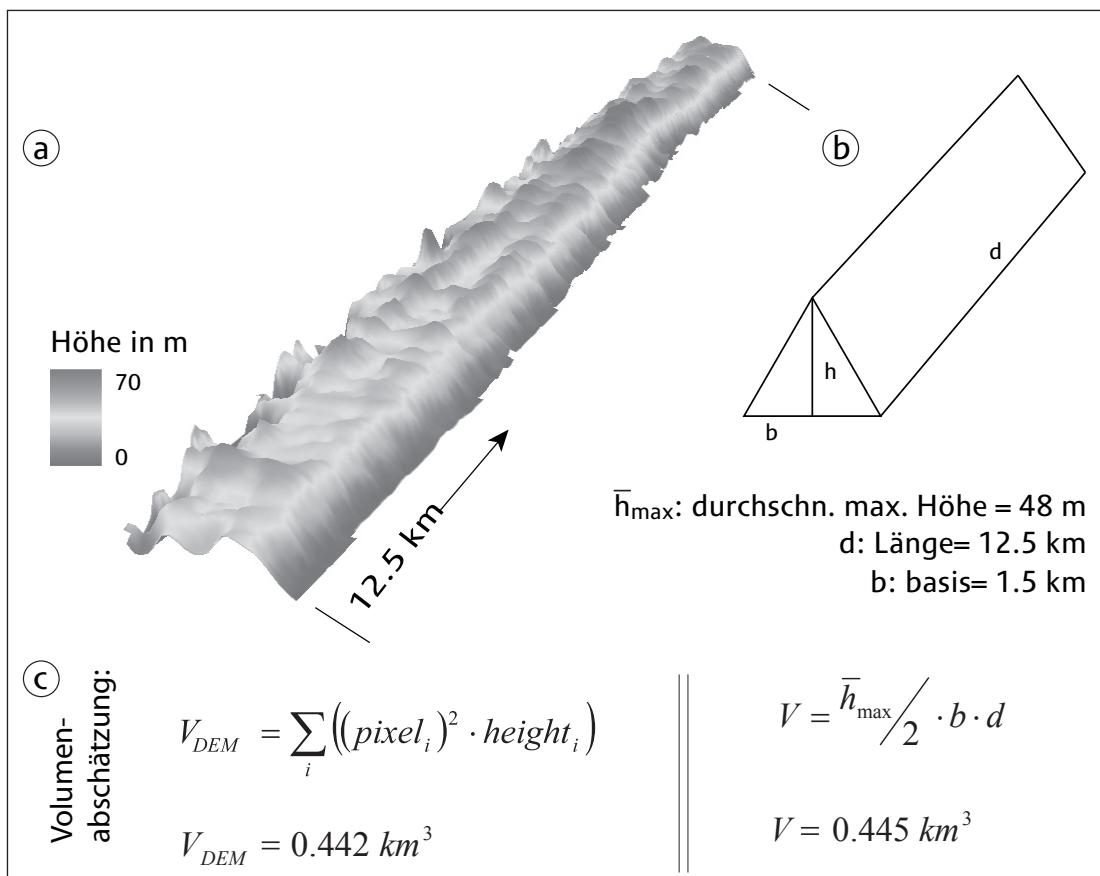


Abb. 5-20: Volumenabschätzung einer 12,5 km langen Draa-Dünen-Kombination der südlichen Großen Sandsee mittels ASTER-Höhendaten. (a) Dreidimensionale Darstellung des extrahierten Höhenmodells. (b) Schematische Darstellung der konventionellen Massenabschätzung. (c) Mathematische Beschreibung der Volumenbestimmung mit der konventionellen Methode und einem digitalen Geländemodell. (verändert nach BUBENZER & BOLTER in press a)

Georadar oder -elektrik können hier für die Große Sandsee neue Erkenntnisse liefern (z.B. HARARI 1996, SWITZER ET AL. 2006).

Das Höhenmodell kann nun direkt dazu genutzt werden, die Sandmasse zu bestimmen, indem jede Pixelfläche mit seiner relativen Höhe multipliziert wird und alle Werte aufsummiert werden (s. Abb. 5-20c). Im vorliegenden Beispiel wurden beide Methoden gegenübergestellt, wobei die Prismaform durch Mittelwerte einzelner Querprofile über das Modell errechnet wurde. Dabei wird jeweils die maximale Höhe eines jeden Profils genutzt und schließlich arithmetisch gemittelt. Die kalkulierten Werte mit $0,442 \text{ km}^3$ (*Modell*) gegen $0,445 \text{ km}^3$ (*Prisma*) stimmen gut überein und zeigen, dass mit dieser Extraktionstechnik die Sandmasse über einen großen Bereich der Großen Sandsee abgeschätzt werden kann.

5.5.4 Einzugsgebietsanalyse der Großen Sandsee zur Bestimmung von Sandquellen

Für Untersuchungen zur Genese der Großen Sandsee spielt die Frage nach den Sandquellen, aus denen die Draa und Dünen aufgebaut sind, eine große Rolle (BESLER in press). Die Sandquellen können dabei Hinweise auf Windregime und morphodynamische Prozesse geben und damit indirekt Informationen über das Paläoklima liefern. Möglichkeiten zur Bestimmung der Sandquellen bestehen mit dem Vergleich von den im Sand enthaltenen Schwermineralien und denen von potenziellen Sandliefergebieten in der Bestimmung von granulometrischen statistischen Momenten aus Dünen sanddaten (z.B. Sortierung oder Kurtosis), durch Datierung des Ablagerungs- oder Umlagerungszeitpunktes durch OSL-Datierungen sowie durch den Vergleich der Sandfarbe (BESLER in press). Für die Große Sandsee sind Hypothesen für einzelne Sandquellen aus den angesprochenen Hinweisen aufgestellt worden (BESLER in press). Durch geomorphometrische Untersuchungen wird versucht, weitere Hinweise auf Sandquellen im Gebiet der Großen Sandsee zu finden. Dabei wird davon ausgegangen, dass durch die Rekonstruktion eines Drainagenetzes bzw. die Verlängerung bestehender Wadis aus den umliegenden Höhenlagen (z.B. des Gilf Kebirs) für das Gebiet der Großen Sandsee die Hauptakkumulationsgebiete aufgefunden werden können. Ansätze zu diesen Fragestellungen sind indirekt mit der Analyse von

Radardaten zur Auffindung von abgedeckten Wadis in diesem Gebiet durchgeführt worden (z.B. EL-BAZ 2007, EL-BAZ ET AL. 2000, McCUALEY ET AL. 1982, zur Technik: z.B. BLUMBERG ET AL. 2004).

Vor der Ableitung von Einzugsgebieten in der Großen Sandsee müssen zwei Voraussetzungen gegeben sein:

- (a) Ein flächendeckendes Höhenmodell für den Bereich der Großen Sandsee.
- (b) Entfernung der Longitudinaldünen über dem Untergrundrelief im Modell, da sie durch ihre durchgehende N-S-Komponente eine großflächige Bestimmung von Einzugsgebieten verhindern.

Aufgrund von Angaben zu den beiden möglichen verwendbaren Höhenmodellen in Kapitel 4.2.2 ist eine Erzeugung eines flächendeckenden ASTER-Höhenmodells für den gesamten Bereich der Großen Sandsee mit einem vertretbaren Aufwand nicht möglich und für die genutzte Maßstabsebene auch nicht notwendig. Dies zeigt auch die Tatsache, dass vom ASTER SCIENCE TEAM (2007) bisher keine Höhenmodelle für größere Bereiche angeboten werden. Damit bleibt für die Ableitung nur das SRTM-3-Höhenmodell verfügbar. Ältere, in Tabelle 4-2 (in Kap. 4.2.2) vorgestellte Modelle, kommen aufgrund ihrer Auflösung und des Höhenfehlers nicht in Betracht. Der oben angesprochene Punkt (a) ist somit erfüllt.

Problematisch bleiben die in Kapitel 4.2.2.4 angesprochenen ‚no-data‘-Bereiche, die großflächig und zusammenhängend in der Großen Sandsee vorkommen. Diese Problematik wird seit einiger Zeit in der Literatur diskutiert und verschiedene Lösungsansätze werden vorgeschlagen. BLUMBERG (2006) nutzt alternative Höhendaten zur Füllung der SRTM-3-Fehlstellen und CRIPPEN ET AL. (2007) schlagen vor, ASTER-Thermaldata einzusetzen. Die zweite Methode scheidet aus folgenden Gründen aus: Die zunächst überraschende Methode, Thermaldata zu nutzen, um Höhenwerte zu bestimmen, funktioniert nur in Gebieten hoher Reliefenergie (z.B. im Hochgebirge), da davon ausgegangen wird, dass das Temperatursignal, das mit den Kanälen 10-14 des ASTER-Systems (vgl. Abb. 4-1) aufgenommen wird, höhenabhängig ist, da die Temperatur idealerweise linear mit der Höhe abfällt. Damit wird klar, dass die Methode nur bei sehr starken Höhenunterschieden und bspw. nicht bei einer Temperaturinversion funktionieren kann. Ansätze zur ersten Methode, die auf den ersten Blick

simpel erscheint, sind ebenfalls im Teilprojekt E1 des SFB 389 vom Autor verfolgt worden und sollen hier nun für die Große Sandsee vorgestellt werden.

Abbildung 5-21 gibt einen Überblick über das SRTM-3-Modell in der Großen Sandsee und zeigt die Gebiete mit zusammenhängenden ‚no-data‘-Bereichen.

Für das Füllen der ‚no-data‘-Gebiete mit ASTER-Daten sind theoretisch folgende Schritte notwendig (vgl. BOLTEN & BUBENZER (in press)):

1. Maskierung der ‚no-data‘-Regionen im SRTM-3-Modell.
2. Auswahl einer passenden ASTER-Szene, die Teile der ‚no-data‘-Region abdeckt, aber auch herkömmliche Datenbereiche der SRTM-3-Daten erfasst. Verändern der Auflösung der ASTER-Daten auf 90 m.
3. Bestimmung eines Abweichungskoeffizienten der ASTER-Daten zu den SRTM-3-Daten.

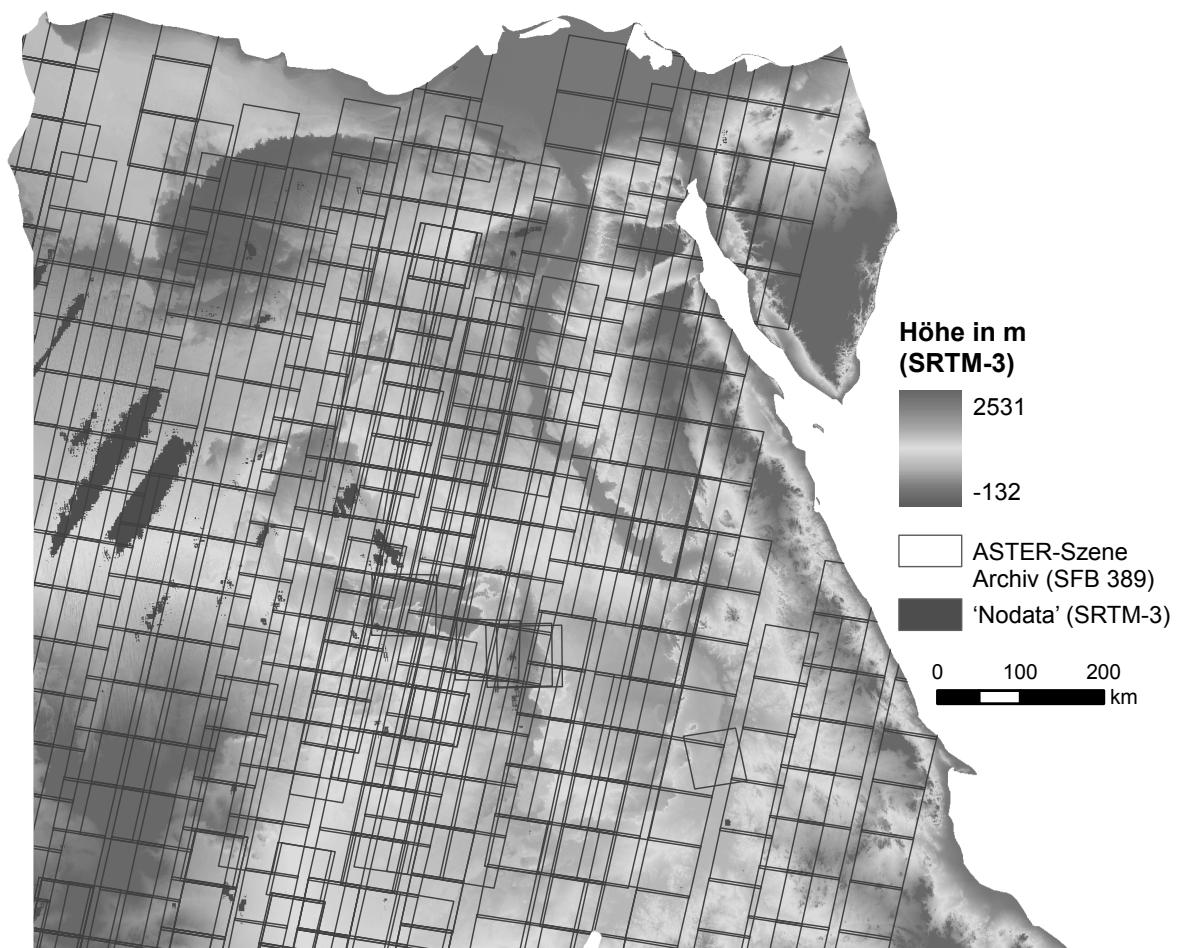


Abb. 5-21: Ägypten im SRTM-3-Modell. Markiert sind die großen zusammenhängenden ‚no-data‘-Bereiche, die vor allem in der Großen Sandsee liegen. Kleinere ‚no-data‘-Bereiche können in diesem Maßstab nicht dargestellt werden, sind jedoch weiträumig vorhanden. Die Kästen markieren, die im Teilprojekt E1 des SFB 389 archivierten ASTER-Szenen für das dargestellte Gebiet. (eigener Entwurf)

4. Maskierung der ASTER-Daten für den Bereich der SRTM-3-'no-data'-Daten und Verrechnung mit dem Abweichungskoeffizienten.
5. Einsetzen der ASTER-Daten in das SRTM-3-Höhenmodell.

In der Praxis wird in Abbildung 5-22 das Vorgehen für eine ASTER-Szene mit den nötigen Zusatzarbeiten detailliert dargestellt und erläutert (die Bezeichnung a-f bezieht sich im Folgenden auf die Abbildung 5-22. Die Abbildungsnummer wird zur Verbesserung der Lesbarkeit nicht wiederholt):

- Teil (a) zeigt den westlichen Teil der Großen Sandsee mit dem SRTM-3-Modell und den Rahmen der verfügbaren ASTER-Szenen. Szene 1668 ist als ausgewählte ASTER-Szene in der Abbildung markiert. Aufgrund der unterschiedlichen Projektionseinheit (Grad und Meter) müssen alle Daten durch Umprojektion vereinheitlicht werden. Darüber hinaus ist eine Lageanpassung zueinander nötig, da für den beschriebenen Vorgang alle Pixel-Zentren lageidentisch liegen müssen, weil ansonsten durch Teilüberlagerung der Pixel einzelne Bereiche während der Rechenschritte verloren gehen. Die Umprojektion (SRTM-3 nach UTM mit 90 m Auflösung und ASTER auf 90 m Auflösung; ein Sphäroidwechsel ist nicht notwendig) und Lageanpassung („Snapping“) ist mit ArcGIS-Methoden durchführbar.
- Teil (b) zeigt den Bereich der ASTER-Szene 1668 und die Punkte, die zur Angleichung der Höhe der ASTER-Szene an das SRTM-3-Modell genutzt werden. Den Punkten werden die Werte der an derselben Stelle liegenden ASTER- und SRTM-3-Höhendaten übergeben, sodass in Tabellenform die Position des Punktes und die beiden Höhendaten vorliegen. Histogramme zu beiden Datensätzen zeigen die Normalverteilung der Stichproben. Abbildung 5-23 stellt die Punkte als Diagramm dar, dabei sind die Höhenwerte von Westen nach Osten zeilenweise aufgetragen. Deutlich sind in beiden Modellen die

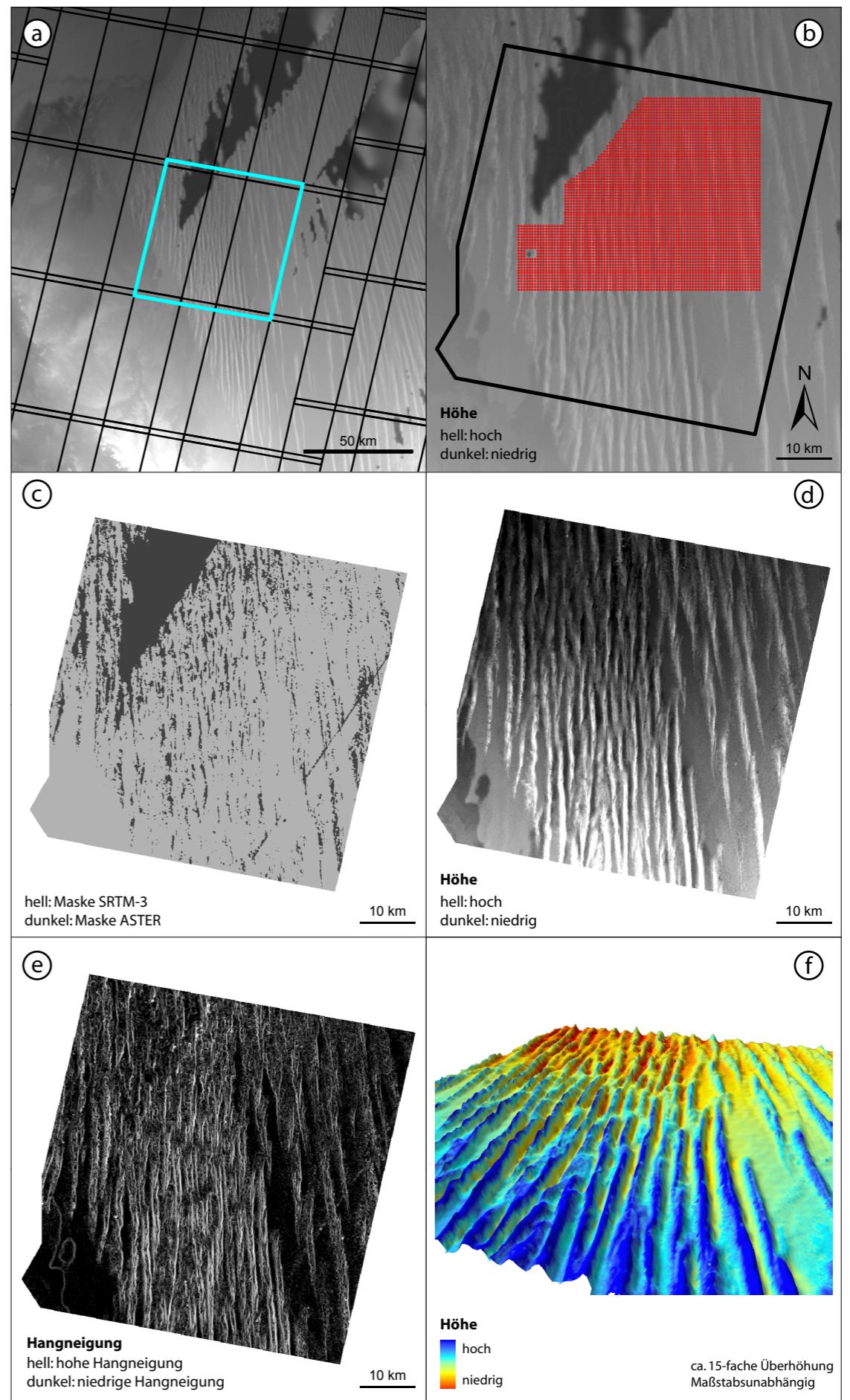


Abb. 5-22: Füllen des SRTM-3-Modells in der Großen Sandsee mit ASTER-Höhendaten. (a): Bereich der südwestlichen Großen Sandsee (SRTM-3) mit den Grenzen archivierter ASTER-Szenen (markiert ist Szene 1668). (b): Datenpunkte zur Kalibration der Höhe des ASTER-Modells. (c): Maskierung für ASTER und SRTM-3. (d): Kombinationsmodell aus SRTM-3- und ASTER-Daten. (e): Hangneigungsbild für das Kombinationsmodell. (f): 3D-Darstellung des Kombinationsmodells. Weitere Informationen im Text. (eigener Entwurf)

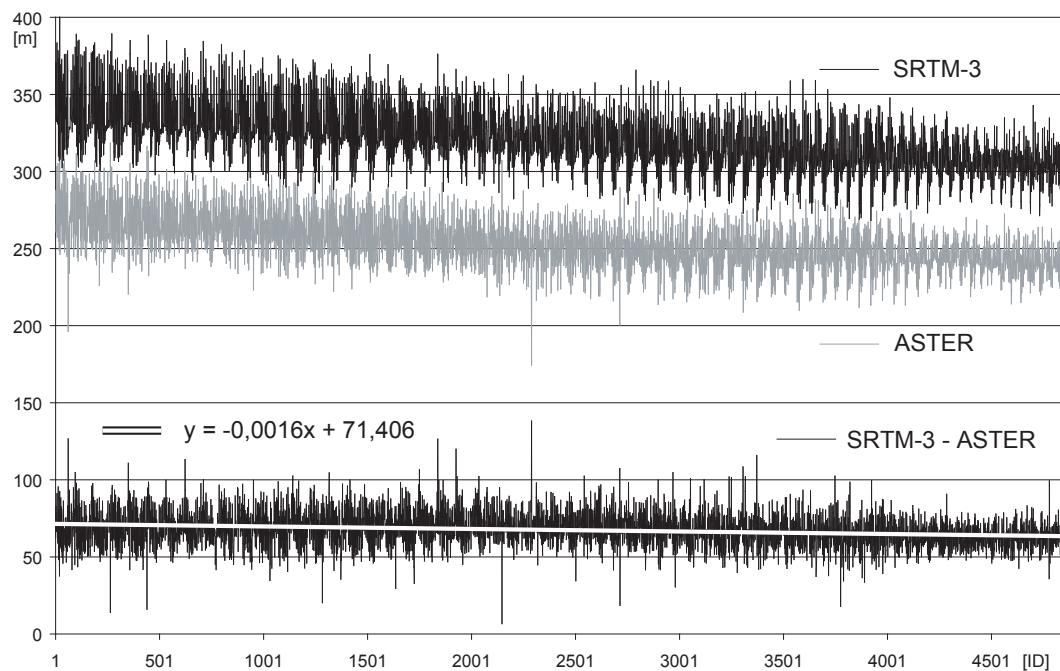


Abb. 5-23: Bestimmung des Abweichungskoeffizienten für die ASTER-Szene 1668 gegenüber dem SRTM-3-Modell. Die Höhen der Punkte aus Abb. 5-22b sind zeilenweise von Norden nach Süden aufgetragen. Gut zu erkennen sind die einzelnen Kämme der Longitudinaldünen. Weitere Informationen im Text. (eigener Entwurf)

einzelnen Dünenzüge zu erkennen. Im unteren Teil des Diagramms ist die Differenz aufgetragen. Die Ausgleichsgerade zeigt den nahezu linearen Zusammenhang der beiden Modelle (Steigungswert von nur 0,0016) jedoch mit einem Versatz von mehr als 71 m.

- Teil (c) zeigt die Auswahl für die Maskierung der Modelle (Hellgrau: SRTM-3; Dunkelgrau: ASTER). Die Maskierungsdaten stammen aus den ‚no-data‘-Bereichen der SRTM-3-Rohdaten. Das Gegenstück zur Maskierung ist durch Reklassifizierung gebildet worden. Für alle dunklen Gebiete werden nun die ASTER-Höhendaten ausgeschnitten. Die Reklassifizierung und Maskierung ist mittels ‚SpatialAnalyst‘ in ArcGIS möglich.
- Teil (d) zeigt die Kombination der beiden Modelle, die über die Funktion ‚Mosaic‘ in ArcGIS durchgeführt wurde.
- Teil (e) zeigt das Hangneigungsbild von (d). Es sind keine Artefakte zu erkennen, die auf einen Kombinationsversatz zurückzuführen wären. An den

Mosaikgrenzen wären lineare Versatzstücke hoher Hangneigung zu erkennen. Dies spricht für die hohe Genauigkeit des Einsetzens der ASTER-Daten.

- Teil (f) zeigt das Modell aus (d) in einer 3D-Ansicht und gibt einen Eindruck der hervorragenden Qualität des Kombinationsmodелles.

Das Ergebnis zeigt einen homogenen Datensatz ohne ‚no-data‘-Regionen und hoher Qualität.

Der oben angesprochene Punkt (b) zu Beginn des Kapitels (Seite 107) bedarf der Erzeugung eines Untergrundreliefs für die Große Sandsee, indem die Longitudinaldünen aus dem Modell entfernt werden. Dies entspricht der Ableitung eines Paläo-Höhenmodells. Die Ableitung solcher Modelle wird explizit als ein zukünftiges Forschungsfeld in der Geomorphometrie angesehen (DIKAU 2006). Dazu wird der in Kapitel 4.3 (Abb. 4-23) vorgestellte topographische Index zur Trennung von ‚upland‘ und ‚lowland‘ genutzt, um die Longitudinaldünen im Modell zu identifizieren. Abbildung 5-24b präsentiert das Ergebnis für einen Ausschnitt der Großen Sandsee. Dazu wird die Auflösung des Modells verringert, um eine deutliche Trennung zwischen lokal *hoch* gleich Düne und lokal *tief* gleich Gasse zu erhalten. Neben den zusammenhängenden Gebieten werden auch kleine Artefakte ausgewählt (Abb. 5-24b), die jedoch durch zwei Filtermaßnahmen aus der Kalkulation entfernt werden können. Erstens, wenn davon ausgegangen wird, dass große zusammenhängende Bereiche ausgewählt werden sollen, können diese über ihre geringe Fläche von wenigen Pixeln identifiziert und gelöscht werden. Zweitens Filter, die die zusammenhängende Pixelanzahl prüfen, um kleine Gruppen von Pixeln auszuwählen und zu löschen. Beide Filter lassen sich mit den im ‚SpatialAnalyst‘ in ArcGIS angebotenen Werkzeugen programmieren.

Die nun entstehenden Leerbereiche (vgl. Abb. 5-24b) werden mit einer einfachen Interpolation wieder gefüllt. Dabei werden die Randwerte durch lineare Funktionen miteinander verbunden und den dazwischen liegenden Pixeln in Abhängigkeit von ihrer Entfernung die Höhenwerte der Geradenfunktion zugeordnet (CONOLLY & LAKE 2006). Folgender Zusammenhang wird für die ‚Inverse Distance Weighted‘ (IDW-) Methode genutzt:

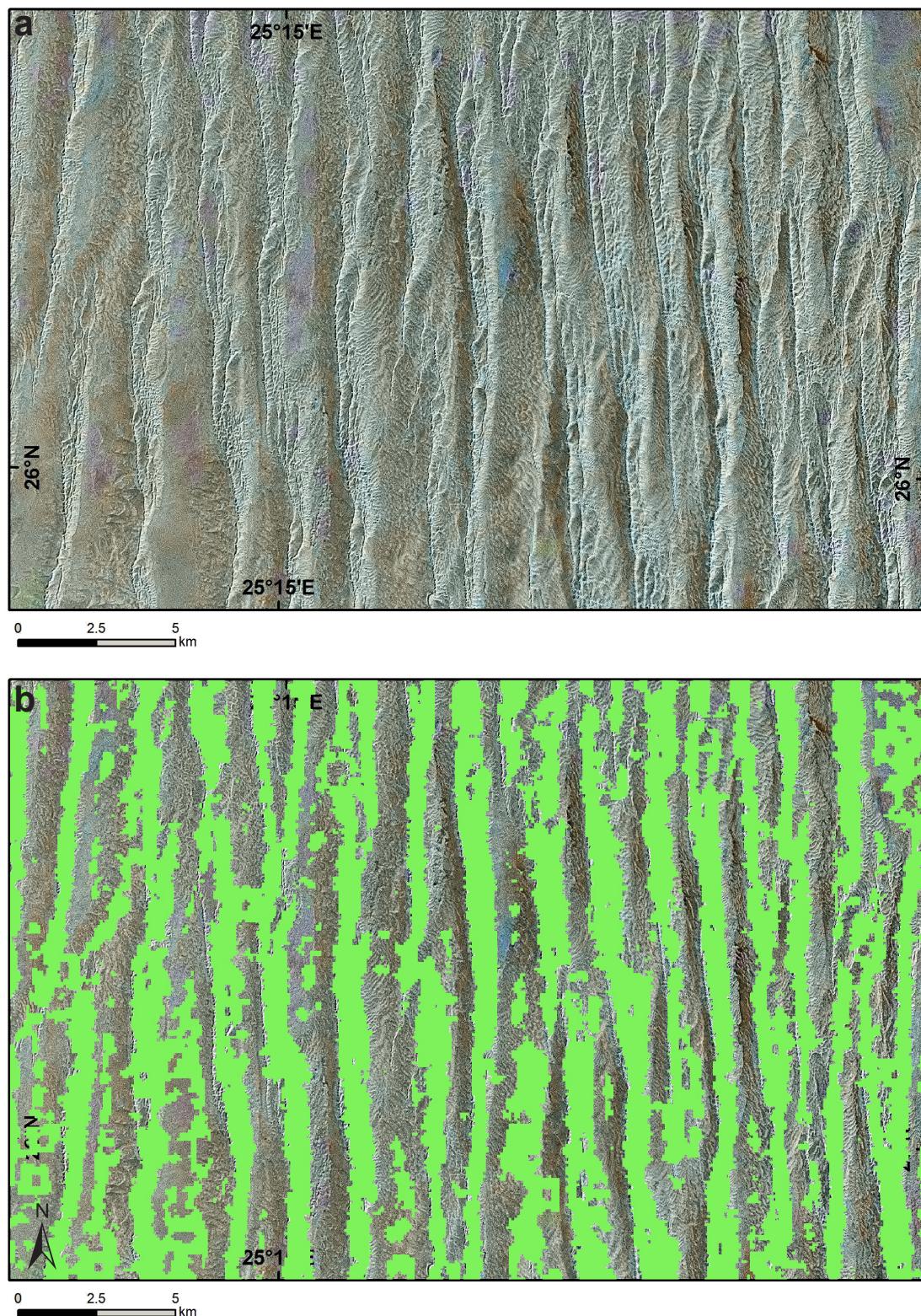


Abb. 5-24: Identifikation von Longitudinaldünen über einen topographischen Index (vgl. Kap 4.3, Abb. 4-23). (a) Satellitenbild der Region. Gut zu erkennen sind die Longitudinaldünen mit den aufsitzenden Silk in mehreren parallelen Reihen pro Draa. (b) In grün dargestellt die Identifikation über den topographischen Index. (eigener Entwurf)

$$\hat{z}(x_0) = \frac{\sum_{i=0}^n z(x_i) d_j^{-r}}{\sum_{i=0}^n d_j^{-r}}$$

mit $\hat{z}(x_0)$ Höhenwert \hat{z} für gesuchte Position x_0 ,

n Anzahl der genutzten Nachbarwerte (meist 12 oder 8),

$z(x_i)$ bekannter Höhenwert,

d_{ij} Distanz zwischen bekanntem Höhenwert und

r Gewichtungsfaktor, meist 2, um den Abstand stärker zu berücksichtigen.

Abbildung 5-25 zeigt ein Beispiel für ein zu interpolierendes Pixel, das umgeben ist von einigen bekannten Höhenwerten.

Für die beiden Gewichtungsfaktoren für r (1 oder 2) können nun die folgenden Summen für die 12 umliegenden Pixel (Tab. 5-3) errechnet werden. Damit ergibt sich für die beiden Gewichtungsfaktoren ein Wert von:

$$r=1: \quad 99,3 / 2,56 = 38,8$$

$$r=2: \quad 25,4 / 0,64 = 39,7$$

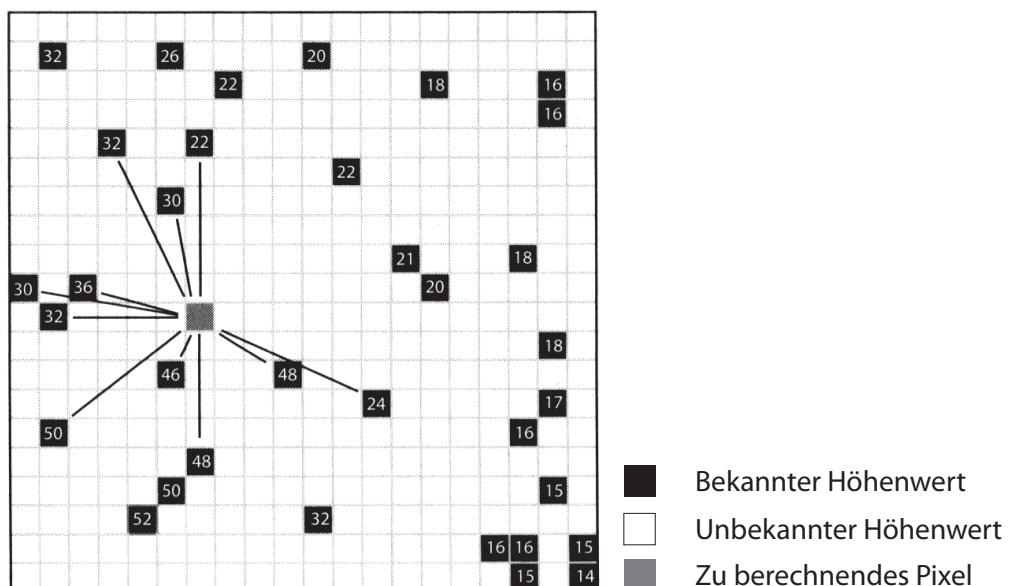


Abb. 5-25: Beispielmatrix zur Berechnung eines unbekannten Höhenwertes aus den umliegenden Pixeln mittels des IDW-Verfahrens. (verändert nach CONOLLY & LAKE 2006)

Tab. 5-3: Berechnungsdaten zu Abbildung 5-40 und der angegebenen Formeln zur IDW-Methode für unterschiedliche Gewichtungswerte. (verändert nach CONOLLY & LAKE 2006)

x_j	$z(x_i)$	d_j	d_j^{-1}	d_j^{-2}	$z(x_i)d_j^{-1}$	$z(x_i)d_j^{-2}$
1	46	2,2	0,45	0,21	20,9	9,5
2	48	3,6	0,28	0,08	13,3	3,7
3	36	4,1	0,24	0,06	8,8	2,1
4	30	4,1	0,24	0,06	7,3	1,8
5	48	5,0	0,20	0,04	9,6	1,9
6	32	5,0	0,20	0,04	6,4	1,3
7	22	6,0	0,17	0,03	3,7	0,6
8	30	6,1	0,16	0,03	4,9	0,8
9	50	6,1	0,16	0,03	8,2	1,3
10	50	6,4	0,16	0,02	7,8	1,2
11	24	6,7	0,15	0,02	3,6	0,5
12	32	6,7	0,15	0,02	4,8	0,7
Total			2,56	0,64	99,3	25,4

Dieses einfache Verfahren gewährleistet, dass sich die Zwischenbereiche unauffällig bei der Berechnung des Drainagenetzes verhalten (die Leerbereiche in Abb. 5-24b werden überwiegend als gestreckte Flächen berechnet). Im vorliegenden Fall sind zwölf benachbarte Pixel genutzt worden mit einem Entfernungsgewichtungswert von zwei.

Das resultierende Höhenmodell (Abb. 5-26) dient nun als Grundlage für die Berechnung des Drainagenetzes und potentieller Einzugsgebiete (Abb. 5-27, s.a. Kap. 4.2 zur Bestimmung von Einzugsgebieten). Deutlich zu erkennen ist die gute Übereinstimmung mit den aus Radardaten abgeleiteten Hauptentwässerungslinien (z.B. EL-BAZ 2007), die nun erstmals weiter nach Norden verlängert werden können. Die Einzugsgebiete passen sich gut in das von BESLER (in press) aufgestellte Modell der Sandquellen der Großen Sandsee ein. Zum einen kommt es durch die Einzugsgebiete zu einer großräumigen Auf trennung in einen westlichen und östlichen Bereich, wobei der Westliche stark beeinflusst ist durch den Gilf Kebir, dessen Material durch einen Schwemmfächer bis 26°30'E reicht (BESLER in press). Diese zentrale Grenze gleicht der Grenze, die aus anderen Rückschlüssen (z.B. Korngrößenverteilungen und Schwermineralanalysen) über die Sandquellen gezogen werden können (BESLER in press). Für den östlichen Bereich der Großen Sandsee wird eine Sandquelle aus dem Gebiet des

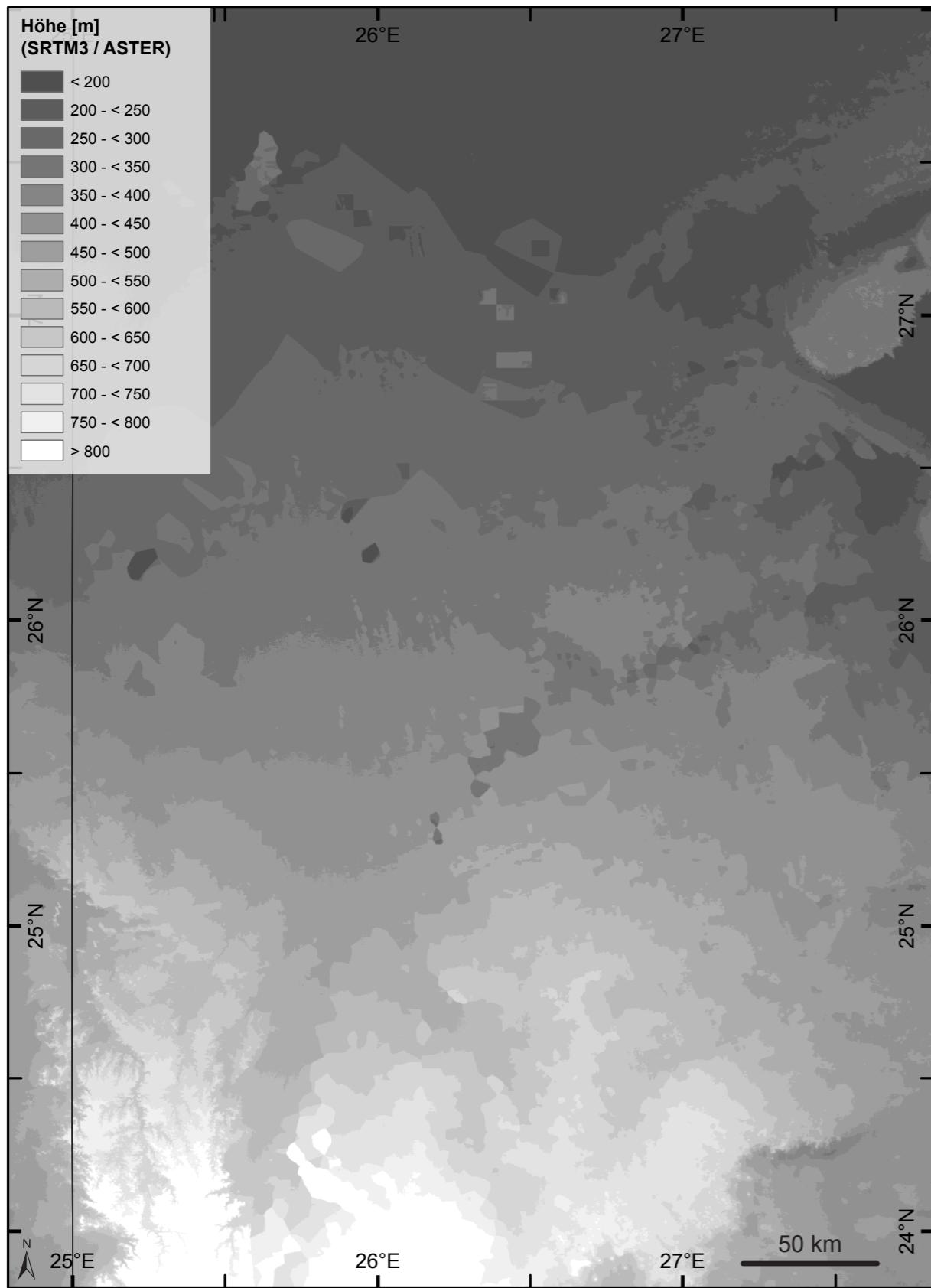


Abb. 5-26: Neu erstelltes Höhenmodell nach Entfernung der Longitudinaldünen und Interpolation der Leerräume (die Region ist in Anhang I dargestellt). Gut erkennbar sind Gebiete, die nicht neu erstellt wurden wie z.B. das Abu Ras Plateau (vgl. Anhang I) im SW. (verändert nach BUBENZER & BOLTEN in press b)

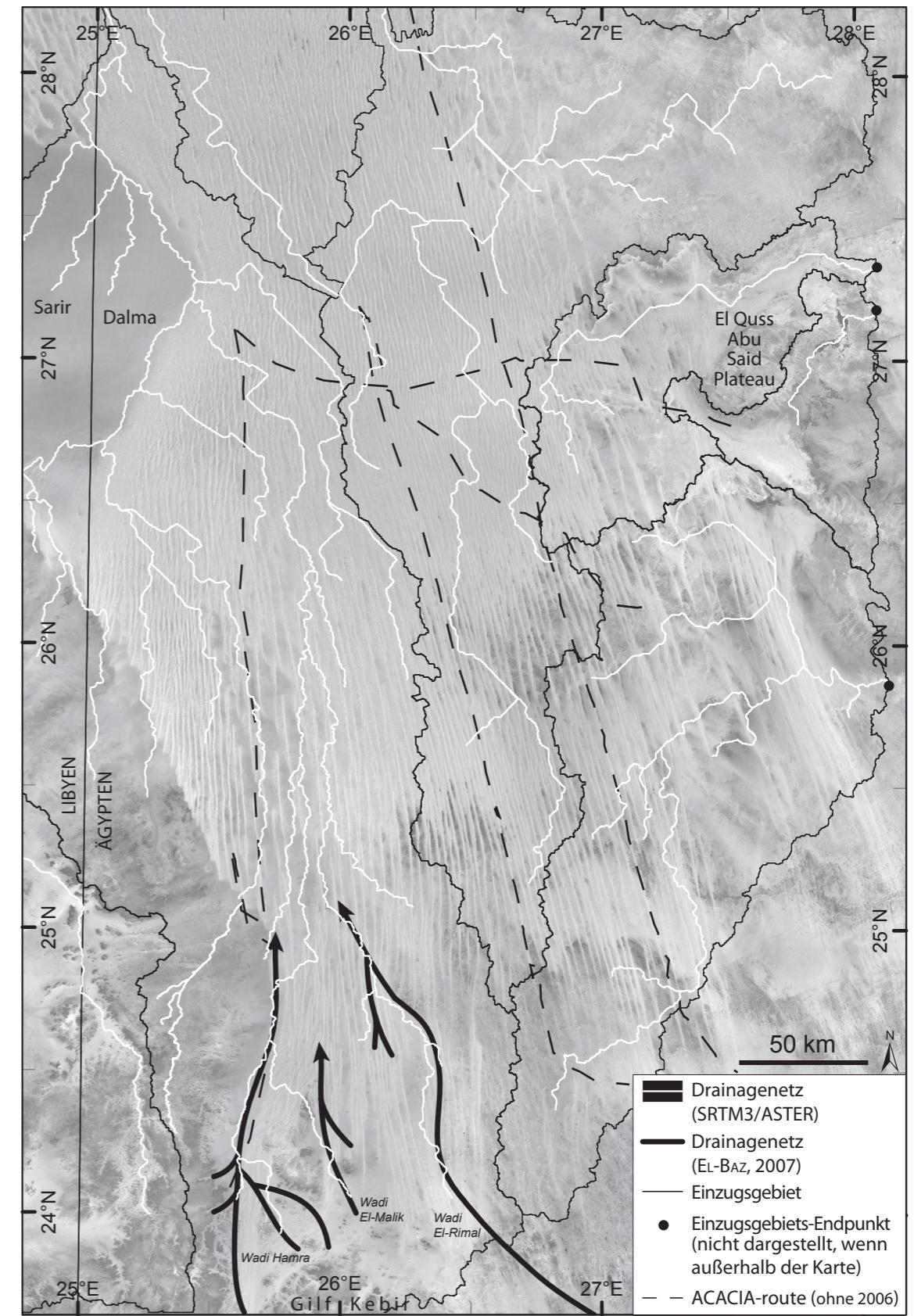


Abb. 5-27: Die neu berechneten Einzugsgebiete und das dazugehörige Drainagenetz überlagert über ein Satellitenbild (Landsat 7). Weitere Informationen im Text. (verändert nach BUBENZER & BOLTEN in press b)

El Quss Abu Said Plateaus (Abb. 5-27) angenommen (BESLER in press). Der Verlauf des Drainagenetzes ist im abgeleiteten Höhenmodell in Richtung Osten (zur Oase Farafra hin) gerichtet. Zur Zeit der Abtragung und Bereitstellung des zum Aufbau der östlichen Großen Sandsee genutzten Materials war das Plateau noch mit Sandstein überdeckt, das heute in Resten gefunden werden kann, bzw. auf der geologischen Karte vermerkt sind. Ebenso muss beachtet werden, dass zwischen der Abtragung, dem fluvialen Transport des Materials und dem Aufbau der Draa viele Tausend Jahre gelegen haben (BESLER in press). Das Einzugsgebiet, in dem sich das Plateau befindet, ist im Norden und Süden begrenzt durch tektonische Verwerfungen und kleinere Schichtstufen. Diese Verwerfungen sind in der geologischen Karte vermerkt, bzw. im südlichen Bereich außerhalb der Großen Sandsee und in Richtung Große Sandsee verlaufend eingetragen (KLITZSCH ET AL. 1987). Eine weitere Sandquelle im westlichen Bereich der Großen Sandsee liegt im Bereich der Sarir Dalma. Ein Nachweis über Einzugsgebietsgrenzen gelingt hier nicht. Der Einfluss des Gilf Kebirs aus Süden ist zu stark und hat möglicherweise das ältere Relief des Schwemmfächers aus der Sarir Dalma überformt (BESLER in press).

5.6 Zwischenfazit – Relief als Grundlage zur Rekonstruktion holozäner Nutzungs-potentiale

Erstmals sind für die Western Desert Ägyptens großflächige hoch aufgelöste digitale Höhenmodelle präsentiert worden. Damit konnte eine Verbesserung der Auflösung um drei Größenordnung von etwa 1000 m auf 30 m Kantenlänge je Pixel erreicht werden. Wo früher im Bereich eines Quadratkilometers nur ein Höhenwert – geringer und wenig bekannter Qualität – zur Verfügung stand, sind nun mit den ASTER-Höhendaten über 1100 Höhenwerte auf gleicher Fläche mit gleichbleibend hoher Qualität verfügbar.

Auf der Basis der Vorüberlegungen in den Kapiteln 2 und 4, die andeuten, welche Eigenschaften digitale Höhenmodelle aufweisen müssen, um in der Nutzungs-potential-Analyse und der Landschaftsökologie eingesetzt werden zu können, sind zwei Höhenmodelle analysiert worden. Es konnte gezeigt werden, dass die Modelle

unterschiedliche Einsatzgebiete abhängig von der Fragestellung, dem Maßstab und der Größe der Untersuchungsregion abdecken.

Aufgrund der höheren Auflösung und des etwas geringeren Fehlers ist der Einsatzmaßstab der ASTER-Daten grundsätzlich größer als bei den SRTM-3-Daten. Die geforderte chorologische Maßstabsebene, die für die vorliegende landschaftsökologische Fragestellung eingesetzt wird (vgl. Kap. 2.2.1), ist nur mit den ASTER-Daten erreichbar. Die SRTM-3-Daten eignen sich aufgrund der großräumigen Abdeckung und ihrer Auflösung für Fragestellung ab einem Maßstab von etwa 1:100.000 und bieten durch ihre Abdeckung sehr gute Möglichkeiten für Raumvergleiche. Der Nachteil nicht vorhandener Datenpixel lässt sich durch Interpolation oder Füllung mittels anderer, vergleichbarer Höheninformationen lösen. Für die Western Desert ist ein Verfahren zu Füllung mit ASTER-Höhendaten entwickelt und erfolgreich angewendet worden, das auf andere Gebiete übertragbar ist.

Inhaltlich konnte mit den in Kapitel 5.1-5.5 vorgestellten Studien die Nutzbarkeit der Höhendaten in geomorphologischen wie geoarchäologischen Fragestellungen gezeigt werden. Erstmals liegen nun aus Höhenmodellen abgeleitete Informationen zu Einzugsgebieten der Western Desert allgemein und speziell der Großen Sandsee sowie anderer besonders für archäologische Fragestellungen genutzte Untersuchungsgebiete vor. Die Ergebnisse aus Radardaten abgeleiteten „radar river“ (McCAULEY ET AL. 1982, EL-BAZ 2007) konnten im Bereich der südlichen Großen Sandsee bestätigt und nach Norden erweitert werden. Der Einsatz von ASTER-Höhendaten zur Ableitung bestehender Weidetypen im nördlichen Namibia unterstreicht die Nutzbarkeit im interdisziplinären Umfeld und zur Abschätzung von Informationen zum aktuellen Nutzungspotential einer Landschaft. Der verstärkte Einsatz und Nutzen von Höhendaten und geomorphometrischer Parameter in anderen Disziplinen zeigt sich in diesem Beispiel und nimmt auch durch die steigende Genauigkeit und Verfügbarkeit im Allgemeinen zu (DIKAU ET AL. 2006).

Aufgrund der Kostenneutralität beider Modelle können hochauflösende Höhenmodelle nun für nahezu jedes Gebiet, insbesondere für Gebiete ohne oder nur niedrig aufgelöster digitaler Höheninformationen, angefertigt und für landschaftsökologische Fragestellungen genutzt werden. Dies gilt in besonderem Maße für Länder arider und

semiarider Gebiete, die keine oder nur spärliche niedrige Vegetation aufweisen und somit ideale Bedingungen für die Ableitung von Höhendaten aus stereoskopischen Satellitenbildern bieten und meist keine staatlichen hochauflösten Höhendaten bereitstellen.

6. Fallstudien zur Ableitung holozäner Nutzungspotentiale

Die vorliegende Studie untersucht die Daten zweier zentraler archäologischer Fundregionen des SFB 389, um Zusammenhänge zwischen archäologischen und geowissenschaftlichen Daten zu untersuchen. Im Gegensatz zu anderen Studien, die versuchen, frühere Landschaftsausstattungen über aktualistische Bezüge aktuell vorhandener Landschaften zu ziehen (z.B. NEUMANN 1998), arbeitet diese Studie mit autochthonen Daten und leitet aus den Daten selbst Umweltbedingungen für verschiedene Zeiträume im Holozän ab. Dabei werden Geofaktoren bestimmt, die das Leben des Menschen zu unterschiedlichen Zeiten beeinflusst haben könnten. Die archäologischen Daten, die hierzu genutzt werden, stammen neben dem Projekt A1 *Regionale Klimaentwicklung und menschliche Besiedlung zwischen Niltal und Zentralsahara* des SFB 389, auch aus dem Forschungsprojekt B.O.S. *Besiedlungsgeschichte der Ostsahara*. Beide Projekte zeigen eine komplexe Besiedlungsgeschichte (KUPER 1999, GEHLEN ET AL. 2002, RIEMER 2004, in press) und eine Rekonstruktion der paläoökologischen Verhältnisse (BESLER 2002, BUBENZER & HILGERS 2003, BUBENZER & BESLER 2005, KINDERMANN ET AL. 2006) im Zeitraum zwischen 9.000 bis 5.000 BC auf. In der Western Desert Ägyptens sind dabei unterschiedliche Muster archäologischer Funde zu beobachten, die unterschiedlich interpretiert werden können (e.g. ADAMS & FAURE 1997, DE NOBLET-DOCUDRÉ ET AL. 2000). Im vorliegenden Fall wird der Zusammenhang zwischen der räumlichen archäologischen Ausstattung und den geomorphometrischen Parametern der Landschaft analysiert, um daraus Hinweise auf das Nutzungspotential der Landschaft für den Menschen zu bestimmten Zeiten zu erhalten.

Archäologische und geomorphologische Untersuchungen in der Western Desert (GEHLEN ET AL. 2002) haben gezeigt, dass ein Zusammenhang zwischen holozänen archäologischen Fundplätzen und speziellen geomorphologischen Positionen wahrscheinlich ist. Diese sind z.B. die Nähe zu Wadis oder Depressionen (BUBENZER & BESLER 2005) sowie Dünendarlagen in der Großen Sandsee. Um diesen Feldeindruck zu prüfen und um Zusammenhänge zwischen den ableitbaren geowissenschaftlichen Parametern und den archäologischen Erkenntnissen eines Fundplatzes zu erkennen, werden multivariate statistische Analysen (vgl. Kap. 4.4) genutzt.

6.1 Untersuchungsregionen in der Western Desert

Beide Untersuchungsregionen der Western Desert (s. Anhang I) unterscheiden sich stark in ihrer naturräumlichen Ausstattung (vgl. Kap. 3). Gemeinsam ist beiden Gebieten – wie weiten Teilen der Western Desert außerhalb der Oasen –, dass sie ohne größere Überprägung des Menschen untersucht werden können. In den letzten Jahren muss allerdings zunehmend beobachtet werden, dass archäologische Fundplätze und die Umwelt der Region durch so genannten Tourismus in Mitleidenschaft gezogen werden und Schutzmaßnahme dringend erforderlich machen. Erste Ansätze sind mit der Ausweisung von Landschaftsschutzgebieten gemacht worden (vgl. KUPER 2007). Die Lage, zum einen auf dem Kalksteinplateau und zum anderen in der südlichen Großen Sandsee, bedeutet sehr unterschiedliche geographische Voraussetzungen in Bezug auf Relief und Geologie, sodass beide Regionen aufgrund ihrer Lage und dem archäologischen Fundinventar unterschiedlich charakterisiert werden können.

Die Region *Djara* auf dem Kalksteinplateau zwischen dem Oasenbogen und dem Niltal gelegen befindet sich in Reichweite beider ständig durch Wasser versorgten Gebiete, und auch die Funde zeigen den direkten Kontakt zum Niltal und zu den umliegenden Oasen (KINDERMANN ET AL. 2006, KINDERMANN & BUBENZER 2007). Der Raum, der nachgewiesener Weise während des holozänen Optimums auch durch Winterregen beeinflusst worden ist (KINDERMANN ET AL. 2006), kann zumindest zeitweise als Basisstation für den damals lebenden Menschen genutzt worden sein. KINDERMANN & BUBENZER (2007) stellen in einem Schaubild das Beziehungsgefüge des Menschen zwischen dem Umfeld Djaras, dem Niltal und den umliegenden Oasen während des holozänen Optimums dar. In dieser Darstellung wird davon ausgegangen, dass der Mensch während der Regenzeit autark in dieser Region leben konnte, sich jedoch während der Trockenzeit zumindest zeitweise in die Regionen ständigen Wasservorkommens zurückziehen musste.

Die Region *Regenfeld* in der südlichen Großen Sandsee hingegen ist, auf der Suche nach episodisch auftretenden Wasservorkommen, vom hochbeweglichen Menschen aufgesucht oder durchstreift worden. Temporäre Seen müssen aufgrund des heutigen Vorkommens mächtiger Playasedimente zumindest zeitweise hier präsent gewesen sein. Die Region liegt jedoch isoliert von ständigen Wasservorkommen zwischen den Longitudinaldünen der Großen Sandsee (BUBENZER & RIEMER 2007, RIEMER in press).

Anhang I zeigt die Lage der beiden Regionen in Ägypten und Abbildung 6-1a zeigt QuickBird-Satellitenbilder beider Regionen in ähnlichem Maßstab. Da QuickBird-Daten der Region Regenfeld nicht zur Verfügung stehen, ist eine vergleichbare Region der südlichen Großen Sandsee zur Darstellung ausgewählt worden, die vergleichbar

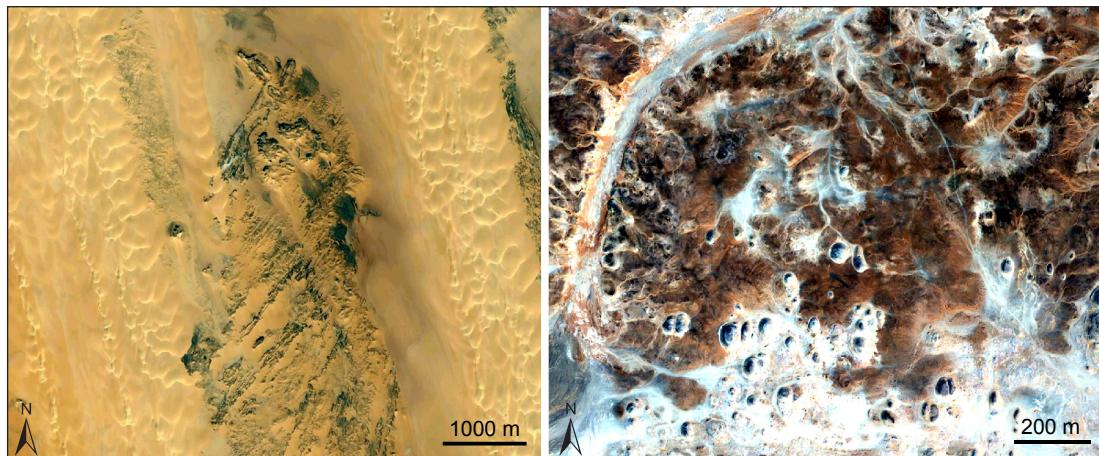


Abb. 6-1a: Die Regionen Djara (rechts) mit gut erkennbarer Fahrspur in der rechten Bildhälfte) und die Umgebung von Regenfeld (ca. 30 km entfernt von der eigentlichen Fundregion) im QuickBird-Satellitenbild. Die Aufnahmen zeigen die unterschiedlichen Landschaftsformen der Regionen. Kleinere Hügel und Senken sowie Fluvialfomeln in Djara und äolische Großformen in Regenfeld. (Djara: SFB 389 TP E1 / eigene Darstellung: Kanalkombination 4,2,1-R,G,B; Regenfeld: GoogleEarth).



Abb. 6-1b: Fotos, die die typische unterschiedliche Landschaftssituation der Regionen wiedergeben und vergleichbar sind mit den Satellitenbildern in Abb. 6-1a. Oben Djara, unten Regenfeld. (Aufnahmen: Djara: H. Thaler; Regenfeld: H. Riemer).

die Situation zwischen den Longitudinaldünen wiedergibt. Zur Gegenüberstellung zeigt Abbildung 6-1b je ein typisches Foto der Regionen. Abbildung 6-2 zeigt beide Regionen mit ihren Fundplätzen und den jeweiligen Berechnungsrahmen zur Ableitung der geomorphometrischen Parameter.

Die Geologie der Western Desert ist bereits grob in Kapitel 3.2 beschrieben worden. Auf Grundlage der geologischen Karten 1:500.000 (KLITZSCH ET AL. 1987) ist eine digitalisierte Version im Teilprojekt E1 des SFB 389 erstellt worden, um die Daten in einem GIS nutzen zu können. Für die Fallstudienregionen ist diese Version in Abbildung 6-3 dargestellt und zeigt die geologisch gegensätzlichen Räume Djara und Regenfeld. Ebenfalls sind die Berechnungsrahmen dargestellt, wie sie mit den beteiligten Archäologen bestimmt wurden. Besonders im Fall der Fundregion Regenfeld muss der Berechnungsrahmen (vgl. a. RIEMER in press) durch die Fachwissenschaftler eingegrenzt werden, da eine Abgrenzung zu anderen Fundplätzen – bspw. in Nachbargassen der Großen Sandsee oder im südlichen Bereich der Fundregion – durch andere Fachwissenschaften kaum möglich ist.

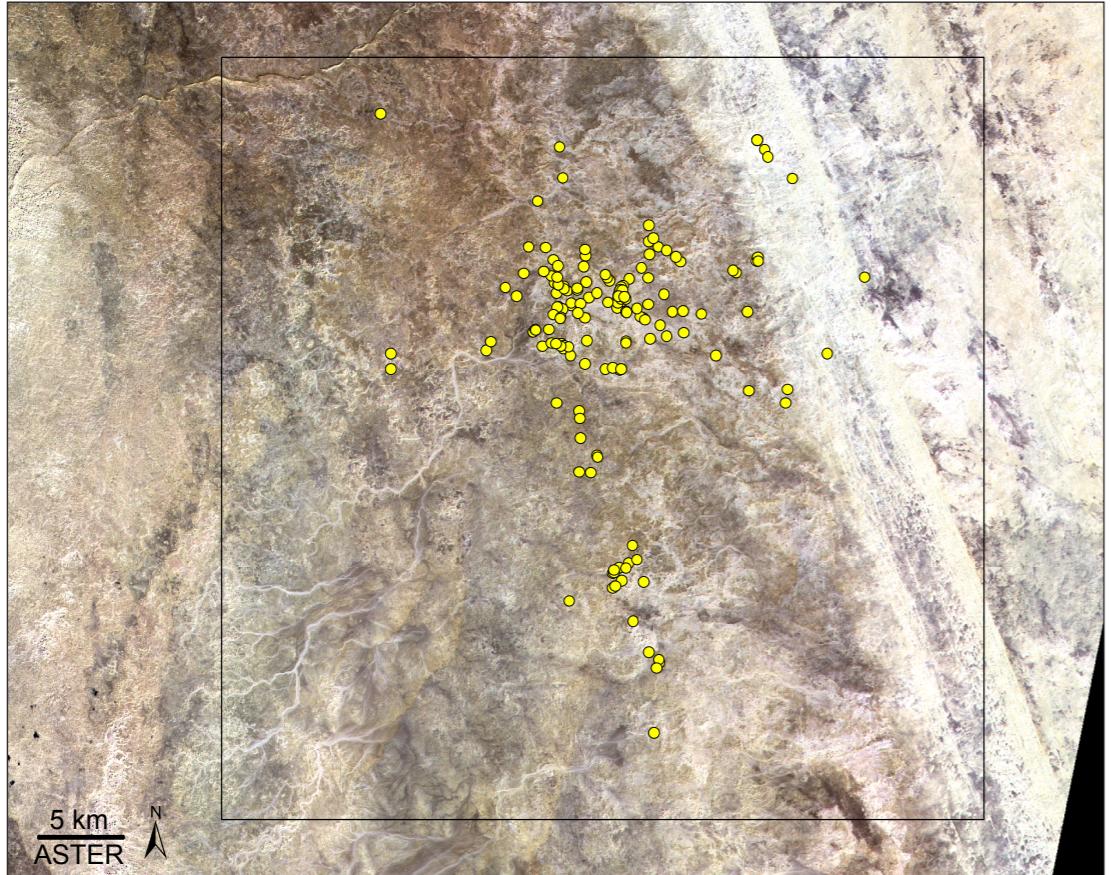
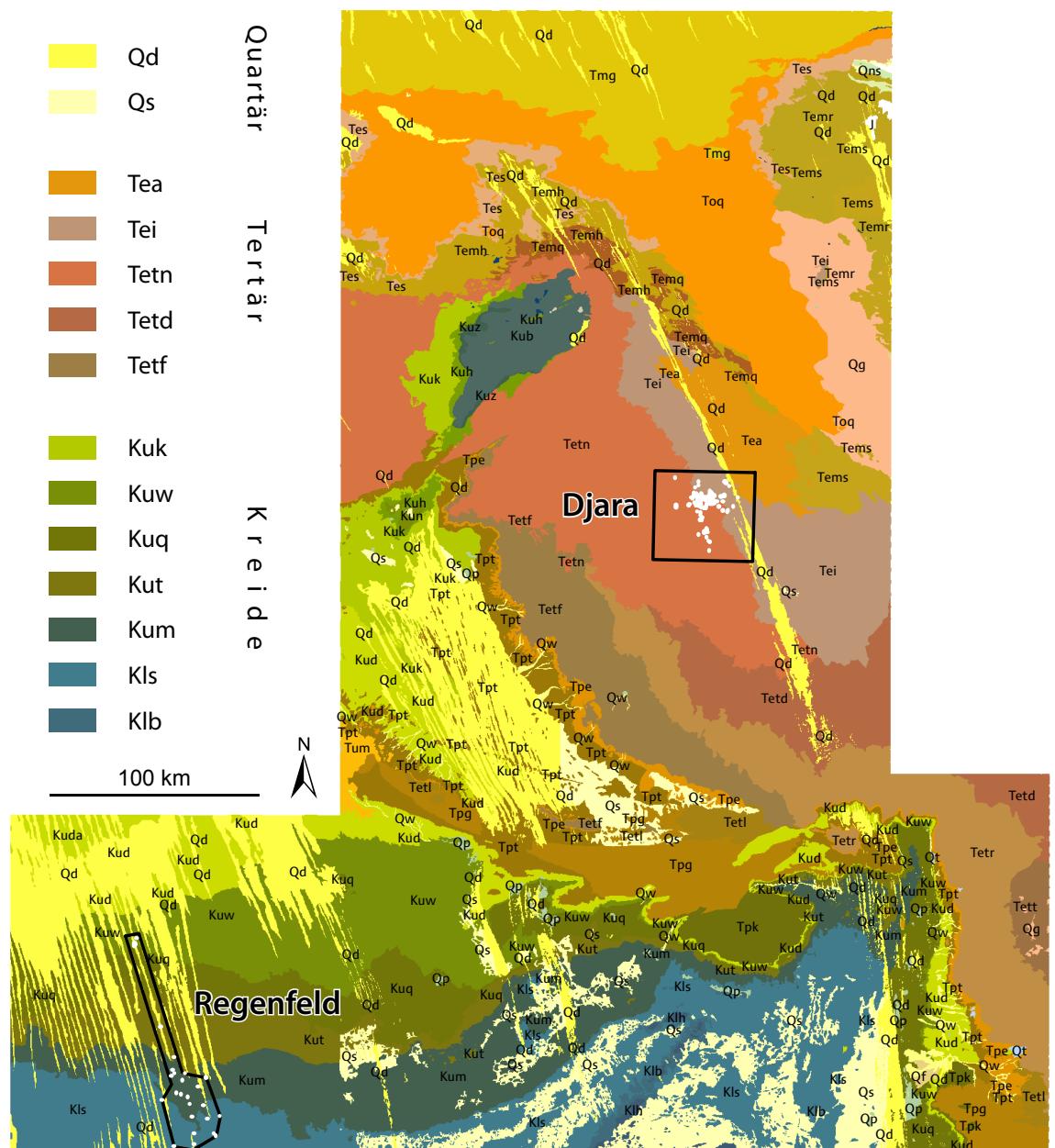


Abb. 6-2: Die archäologischen Fundregionen Djara (oben) und Regenfeld (rechts) im ASTER-Satellitenbild gleichen Maßstabs. Die Fundplätze sind mit gelben Punkten markiert und die jeweiligen Berechnungsrahmen markiert. (eigener Entwurf, vgl. a. Anhang I)





- Qd: Sanddüne

Qs: Sandtenne

Tea: Abu Muharik Formation - Küstennah sedimentierte Tonsteine und schluffige Mergel mit Nummuliten

Tei: Minia Formation - Gut geschichtete, graue lagunäre Kalksteine.

Tetn: Thebes Group, Naqb Formation - Fossilreiche Kalksteine mit dünnen Schieferfertonalagen im Hangenden und rosafarbenen, fossilfreien Dolomiten im Liegenden. Südöstlich von Baharia kreidehaltige und entkalkte oder rekristallisierte Kalksteine.

Tetd: Thebes Group, Drunka Formation - Dichte, dickbankige Kalksteine, partiell riffartig oder lagunär, mit charakteristischen Konkretionen und Flintbändern.

Tetf: Thebes Group, Farafra Formation - Weiße bis graue lagunäre Kalksteine

Kuk: Khoman Formation - Weiße massive neritische Kalksteine

Kuw: Duwi Formation - Phosphat-Schichten, glaukonitische Sandsteine und graue Schiefer tone

Kuq: Quesir Formation - Schieferfert, Schluff- und Sandstein

Kut: Taref Formation - Fluviale und lokal östliche Sandsteine, fein bis mittelkörnig

Kum: Maghrabi Formation - Küstennah abgelagerte schlammige Ablagerungen und Sand steine

Kls: Sabaya Formation - Mittel- bis grobkörnige Sandsteine

Klb: Abu Ballas Formation - Marine Tonsteine im Liegenden, zunehmend Schluff- und Sandsteine im Hangenden

Abb. 6-3: Geologische Formationen nach KLITZSCH ET AL. (1987) für die Fundregionen Djara und Regenfeld (beide Berechnungsregionen sind mit ihren Fundplätzen (weiße Punkte) dargestellt). Nur die wichtigsten Formationen sind erläutert. Für eine vollständige Erläuterung zu den Formationen siehe HERMINA ET AL. (1989). Weitere Informationen in den Kapiteln 6.1.1 und 6.1.2. (eigene Erstellung im Teilprojekt E1 des SFB 389 für diese Arbeit verändert und ergänzt)

Weitere Informationen zur geologischen Karte werden in den jeweiligen Kapiteln der Fallstudienregionen 6.1.1 und 6.1.2 präsentiert. Aufgrund des Maßstabs der Originaldaten ist eine Nutzung der Geologie in der vorliegenden Untersuchung nicht möglich, eine Hinzunahme von geologischen Daten ist jedoch denkbar (vgl. Abb. 2-5), wenn die Aufnahme der Informationen in einem vergleichbaren Maßstab stattfindet.

6.1.1 Djara

Die Djara-Region (ca. 200 m ü. N.N.) liegt zentral auf dem ägyptischen Kalksteinplateau (oft auch *Abu Muharik Plateau* genannt) (s. Anhang I). Das Gebiet wird dominiert von eozänen karbonathaltigem Gestein mit wenigen eingeschalteten Schieferlagen (Tetrn, Abb. 6-3). Die Schichten und die Oberfläche fallen leicht nach NNE ab. Das Relief zeigt Karstformen mit gerundeten niedrigen Hügeln (bis zu 15 m hoch) und leichten Senken (15-20 m tief). Ein sichtbares Drainagenetz (vgl. Abb. 6-1a u. 6-4) ist das Resultat früherer Feuchtphasen. Die spätpleistozäne und rezente Hyperaridität führten zu starkem Windschliff, zum Aufbau des Abu Muharik Dünengürtels und zu einer Serir- oder Hammada-Oberfläche. Die Senken und Wadis sind mit spärlicher Vegetation wie Gräsern, Büschen oder kleinere Pflanzen besetzt, die unabhängig sind vom Grundwasser und mit dem Oberflächenabfluss auskommen (KINDERMANN ET AL. 2006). In der holozänen Feuchtphase erreichten die Niederschläge eine Höhe von 50-100 mm pro Jahr (vgl. Kap. 3.3), sodass es zu episodischen Seen und der Akkumulation von Playasedimenten kommen konnte.

Die archäologische Fundlage der Region umfasst mehr als 70 Fundplätze in einer untersuchten Region von 50 km². Die Datierungen der Fundplätze lassen sich in zwei Phasen Djara A (6.430-6.090 BC) und B (5.872-5.360 BC) einteilen. Die gefundenen Artefakte deuten auf eine hochmobile Jäger- und Sammlergesellschaft hin. Ein starkes Absinken der ¹⁴C-Datierungshinweise am Ende der Phase Djara B deutet auf das Einsetzen der rezenten hyperariden Phase hin (GEHLEN ET AL. 2002, BUBENZER & HILGERS 2003, KINDERMANN ET AL. 2006, BUBENZER & RIEMER 2007).

Die Stabilität des grundsätzlichen Reliefs mit seinen Abflussrichtungen lässt sich durch Indizien, wie schon in Kapitel 3.1 angedeutet, unterstützen. Die in Djara existierende und vielfältig untersuchte Höhle wird von BROOK ET AL. (2003) auf mindestens

300 ka BP datiert. Auf der Oberfläche der um die Fundregion liegenden Hammada sind unbewegte neolithische und mesolithische Steinwerkzeuge zu finden (persönliche Mitteilung Prof. Bubenzer am 9.11.2007).

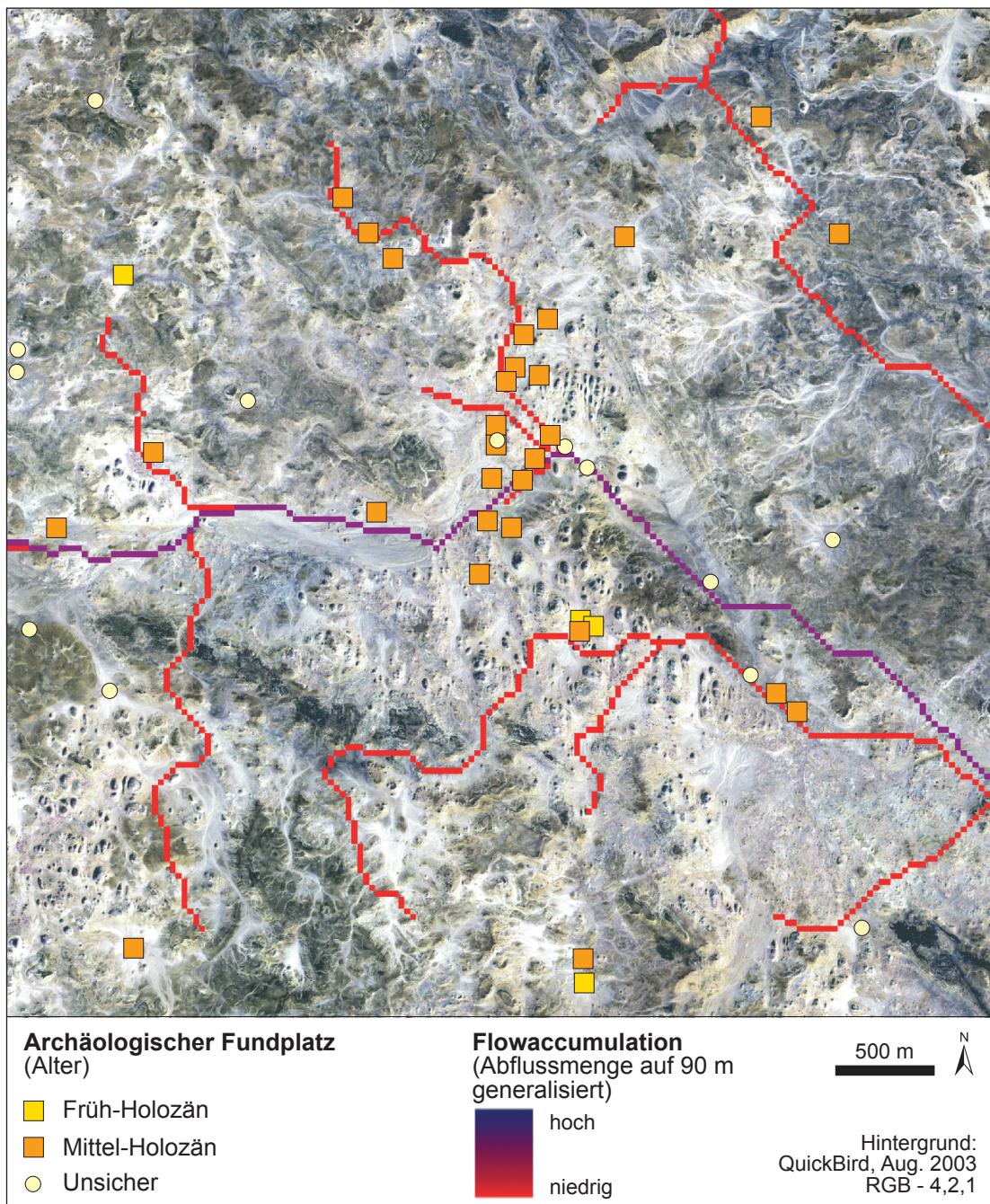


Abb. 6-4: Ausschnitt aus der Fundregion Djara. Dargestellt sind archäologische Fundplätze unterschiedlichen Alters und ein hypothetisches Drainagenetz generiert aus ASTER-Höhendaten. Der Hintergrund des Bildes zeigt QuickBird-Satellitenbilder deren Auflösung wesentlich höher ist als die der ASTER-Daten. Aus diesem Grund zeigt das Drainagenetz in den flacheren Gebieten Abweichungen. Der Zentralbereich mit den stärksten erkennbaren Abflussbahnen wird jedoch gut mit hohen Abflusswerten wiedergegeben (blaue Bereiche des Drainagenetzes). (eigener Entwurf; Koordinaten sind in dieser Karte bewusst nicht dargestellt)

6.1.2 Regenfeld

Die Regefeld-Region (ca. 400 m ü. N.N.) liegt im südlichen Bereich der Großen Sandsee (s. Anhang I). Das Anstehende besteht aus kretazischen Schiefern, Schluffstein und nubischem Sandstein (von der Kls- im Süden über Kum-, Kut-, Kuq- und Kuw-Formation im Norden, s. Abb. 6-3) und fällt leicht nach Norden ab (BUBENZER & RIEMER 2007, BUBENZER & BESLER 2005). Neben deflatierten holozänen Playas prägen

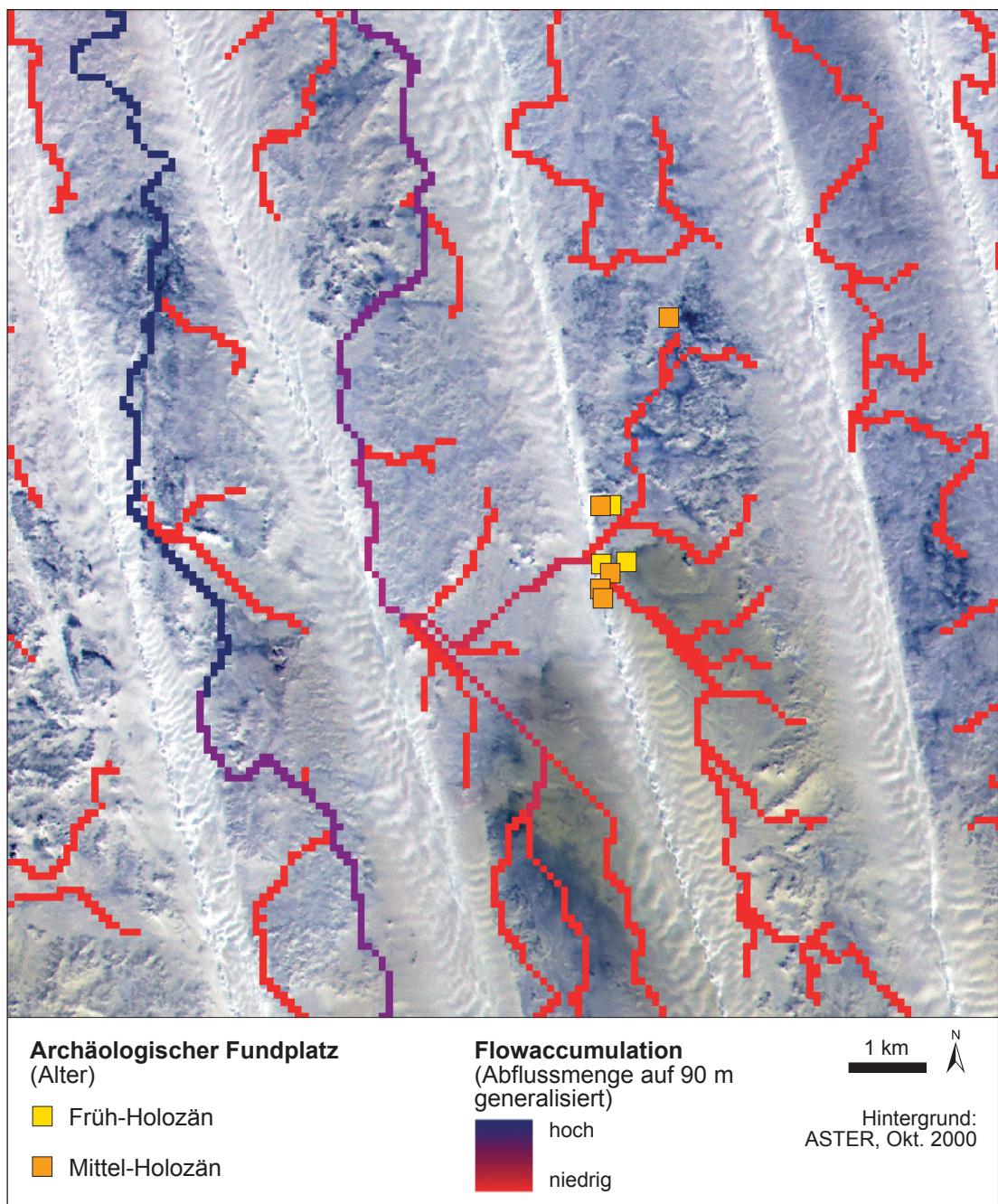


Abb. 6-5: Ausschnitt aus der Fundregion Regenfeld. Gut zu erkennen ist die Lage der Funde zwischen den Longitudinaldünen der südlichen Großen Sandsee. Das Drainagemodell aus ASTER-Daten passt sich hervorragend in die Dünenlandschaft ein. Die Lage der Fundpunkte liegt interessanterweise genau am berechneten Durchbruch des Drainagenetzes. Die dunkelbraunen Regionen im Satellitenbild geben Playaregionen wieder. (eigener Entwurf)

Längsdraa und aufsitzende Silk die Landschaft (Abb. 6-5). Vegetation (Gräser) ist lediglich vereinzelt an der Basis der Dünen vorhanden. Aus geomorphologischer Sicht ist die begünstigte Lage der Region Regenfeld während des holozänen Optimums u.a. mit dem Zufluss von gespeichertem Wasser aus den Draa zu erklären (BUBENZER & BESLER 2005). Der jährliche Niederschlag für diese Region in der holozänen Feuchtphase wird mit 50-100 mm angenommen (GEHLEN ET AL. 2002).

Nach der pleistozänen hyperariden Phase trat die menschliche Besiedlung in Regenfeld um 8.750 BC mit dem Beginn der holozänen Feuchtphase ein. Die Regenfeld-Region lässt sich in vier archäologische Einheiten, drei im frühen Holozän (Regenfeld A-C) und eine im Mittelholozän (Regenfeld D) gliedern. Ähnlich wie in Djara markiert Regenfeld D den Beginn der rezenten Hyperaridität. (GEHLEN ET AL. 2002, BUBENZER & HILGERS 2003, KINDERMANN 2003, BUBENZER & RIEMER 2007).

6.2 Erfassung geomorphometrischer und archäologischer Parameter

Im Folgenden wird die Ableitung geomorphometrischer Parameter nach den in Kapitel 4.3.1 vorgestellten Kategorien und Methoden beschrieben. Die archäologischen Daten wurden aus dem Teilprojekt A1 des SFB 389 übernommen und sind dort von K. Kindermann und H. Riemer für die statistische Analyse aufbereitet worden.

6.2.1 Ableitung geomorphometrischer Parameter aus Höhendaten

Das Fließdiagramm in Abbildung (2-5) in Kapitel 2.2.2 zeigt den Verlauf der Verknüpfung der geowissenschaftlichen und archäologischen Parameter hin zu einer Ableitung von Nutzungspotential-Parametern. Das Modell sieht die Möglichkeit vor, weitere Parameter in die Untersuchung mit einfließen zu lassen. Es ist also ein *offenes* Modell, das je nach Datenverfügbarkeit genutzt werden kann, um geowissenschaftliche Parameter zu untersuchen. Dies bedeutet jedoch auch, dass weitere hier nicht erfasste Parameter ebenfalls einen Einfluss auf das Nutzungspotential haben können.

Im vorliegenden Fall sind beide Untersuchungsgebiete relativ kleinräumig (wenige Dekaquadratkilometer), sodass jeweils eine ASTER-Szene als Abdeckung ausreicht.

Dieser Umstand verbessert die Qualität der Geländedaten, da mögliche Fehler durch ein Mosaik mehrerer Szenen entfallen (vgl. Kap. 4.2.2.3).

Für den gesamten Bereich der Untersuchungsgebiete sind als Reliefdaten die Höhe, die Hangneigung und die Exposition bestimmt worden. Die Hydrologiedaten umfassen das hypothetische Drainagenetz, abgeleitet aus der ‚flow-direction‘ und der ‚flow-accumulation‘, und das Einzugsgebiet. Aus der Kombination der verschiedenen Parameter lässt sich, als eine weitere Klasse von kombinierten Parametern, ein topographischer Index und die Länge des Weges zur nächsten Drainagelinie in Abhängigkeit von der Hangneigung (kein direkter Weg über einen steilen Hügel) ableiten (vgl. Kap. 4.3.1).

Tabelle 6-1 gibt einen Überblick über die genutzten Parameter (vgl. dazu auch Kap. 4.3.1) und gibt nähere Hinweise über den Variablenraum und die Anzahl genutzter Daten. Die Rohdaten sind in Anhang II zusammengefasst.

Tab. 6-1: Geowissenschaftliche Parameter mit ihren Beschreibungen und Einheiten. Die Pixelgröße ist 30 m. Für Djara wurden 5524 Pixel und für Regenfeld 27.174 Pixel erfasst. Die Rohdaten sind in Anhang II zusammengefasst.

Parameter	Einheit	Beschreibung
LAT	m	Rechtswert UTM 35N
LONG	m	Hochwert UTM 35N
ALT	m	Höhe
SLOPE	°	Hangneigung
EXP_NoSo	-1...0...+1	Exposition in Nord-Süd-Richtung
EXP_OsWe	-1...0...+1	Exposition in Ost-West-Richtung
TOPO	Dimensionslose Zahl > 0	Topographischer Index nach MYBURGH (1974) (vgl. Kap. 4.3.1)
FLOAC	Pixelsumme	‘Flow-accumulation‘ am Ort LAT/LONG
FLOACX	Pixelsumme	‘Flow-accumulation‘-Wert am nächstgelegenen Drainagelinienort
HYDRO	Pixelsumme	Maximaler ‚Flow-accumulation‘-Wert im Pixelfeld 7x7
DIST	m	Hangneigungsabhängige Distanz zur nächsten Drainagelinie

6.2.2 Übernahme archäologischer Daten

Bei Übernahme der Daten der Fundregionen ergibt sich die Problematik der Interoperabilität, die in Kapitel 4.1.5 bereits ausgeführt wurde. Die Daten sind in die Untersuchung nicht als Rohdaten eingeflossen, da die Verarbeitung inklusive der Generalisierung nicht hätte fehlerfrei oder missverständnisfrei durchgeführt werden können. Vielmehr ist die Generalisierung und Vorverarbeitung der Daten durch die erhebenden Wissenschaftler selbst durchgeführt worden, nachdem sie mit den folgenden Analyseschritten und dem Einsatzzweck der Daten vertraut waren. Dadurch konnte gewährleistet werden, dass die Daten optimal aufbereitet werden und es zu keiner Fehlinterpretation kommt. Der Nachteil dieses Vorgehens ist, dass weitere Fundregionen nicht ohne eine Aufbereitung durch die Archäologie bzw. durch die erhebenden Wissenschaftler untersucht werden können. Vielmehr bedarf es einer langwierigen Aufarbeitung der Funddaten, um ein entsprechendes Datenset zu generieren (vgl. Kap. 4.1.5).

Tab. 6-2: Archäologische Parameter für die Fundregionen Djara und Regenfeld. Die Daten sind speziell für die Fragestellung und den Einsatzzweck durch das Teilprojekt A1 aufbereitet worden. Die Rohdaten sind in Anhang II zusammengefasst.

Parameter	Beschreibung	Kategorien	Anzahl Djara	Anzahl Regenfeld
AGE	Alter	Frühholozän	11	5
		Mittelholozän	77	36
		unsicher	70	0
SIZE	Größe der Fläche des Fundplatzes	klein	108	29
		mittel	45	11
		groß	5	3
DENS	Lagedichte der Funde	isoliert	90	16
		gering	41	20
		hoch	27	7
BLANK	Rohmaterial	vorhanden / nicht vorhanden	96	28
TOOL	Werkzeug	vorhanden / nicht vorhanden	85	23
ARROW	Pfeilspitze	vorhanden / nicht vorhanden	16	10
ADZE	Dechsel	vorhanden / nicht vorhanden	26	0
GRIND	Mahlstein	vorhanden / nicht vorhanden	44	30
HEARTH	Feuerstelle	vorhanden / nicht vorhanden	117	10
OES	Straußeneischale	vorhanden / nicht vorhanden	11	5

Tabelle 6-2 gibt einen Überblick über die genutzten Variablen, den Variablenraum, sowie die Gesamtanzahl der Funddaten je Fundregion. Für beide Regionen wurden Multilevel-Analysen angewandt, die verschiedene Maßstabsebenen umfassen, um die Daten für diese Untersuchung zu vereinheitlichen. Die Alterseinstufung der Funde wurde mit Hilfe von 41 ^{14}C -Datierungen (GEHLEN ET AL. 2002) an Typusfunden durchgeführt.

6.3 Statistische Analyse der Datensätze

Zur Analyse der beiden Datentabellen (6-1 und 6-2) wird die multivariate ‚Canonical Correspondence Analysis‘ (CCA) genutzt (s. Kap. 4.4).

Im vorliegenden Fall wird die Datentabelle mit den archäologischen Informationen bestimmter Punktdaten mit der Tabelle der geomorphometrischen Informationen verglichen. Die statistische Analyse wurde mit den Software-Programmen SYSTAT 10 (Systat software Inc.), CANOCO 4 (TER BRAAK & SMILAUER 1998) und PC-ORD 4 (MC CUNE & MEFFORD 1999) von Frank Darius (Teilprojekt E1 des SFB 389) durchgeführt. Bei den Ergebnissen der Analyse hat sich herausgestellt, dass vor allem die Parameter TOPO und HYDRO (s. Tab. 6-1) die meisten Ergebnisse beinhalten, sodass diese im Weiteren besonders behandelt werden.

In einem ersten Schritt zur Auswertung der Daten ist die Betrachtung von Häufigkeitsdiagrammen fundplatzübergreifend hilfreich, die einzelne Variablen in ihrer Häufigkeit gegenüber anderen Variablen darstellen. Dabei wird in die Gegenüberstellung von konkreten Variablenpaaren und der Betrachtung des statistischen Hintergrundes unterschieden, um hier qualitativ Unterschiede erkennen zu können.

Für den TOPO-Index ergeben sich damit die in Abbildung 6-6 dargestellten Häufigkeitsdiagramme. Diese sind immer in Gruppen zu interpretieren. Zum einen der TOPO-Index gegenüber einer bestimmten Variablen und der TOPO-Index gegenüber allen anderen Daten, die diese Variable nicht enthalten. So kann erkannt werden, ob die Daten statistisch gleich oder unterschiedlich verteilt sind. Das erste Diagrammpaar in Abbildung 6-6 prüft, ob der TOPO-Index überhaupt für die hier am meisten vorkommenden mittelholozänen Fundplätze eine unterschiedliche statistische Darstellung aufweist, indem alle anderen Pixel der untersuchten Region gegenübergestellt

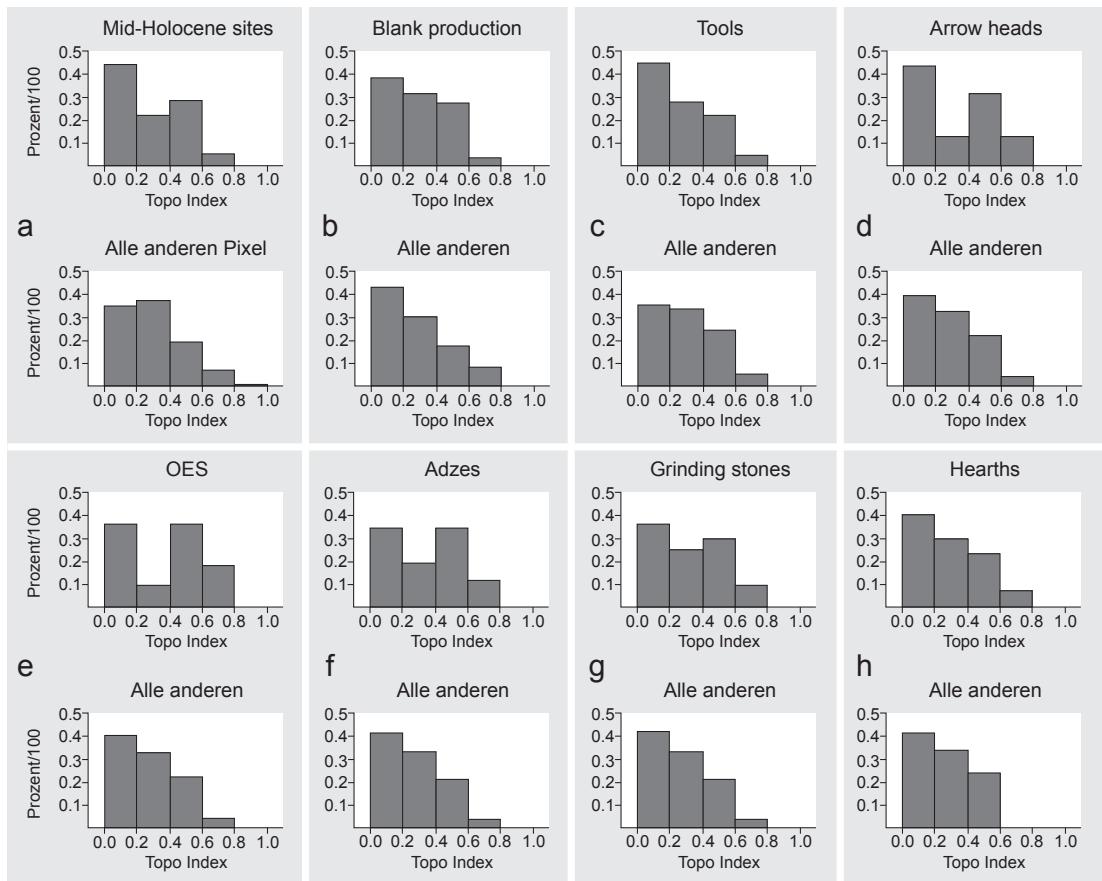


Abb. 6-6: Häufigkeitsdiagramme zum TOPO-Index. Dargestellt ist der normierte TOPO-Index (0-1) gegenüber einer anderen Variablen. Gruppe (a): alle mittelholozänen Fundplätze und alle anderen Pixel. Gruppen (b) bis (h): alle Inventare und jeweils alle anderen Fundplätze, die das Inventar nicht enthalten. Die Balken ergeben kumuliert jeweils den Wert 1. Weitere Informationen im Text. (verändert nach Bolten et al. in press) (für Abkürzungen der archäologischen Parameter vgl. Tab. 6-2)

werden. Sollte hier kein Unterschied in den Diagrammen vorhanden sein, wäre der TOPO-Index nicht aussagekräftig. Der Unterschied ist jedoch sehr deutlich, sodass die weiteren Diagrammpaare eine gewisse Aussagekraft besitzen. Bei den weiteren Paaren fällt auf, dass bestimmte Fundplatzparameter auf den TOPO-Index statistisch stark reagieren. Dies sind vor allem die Pfeilspitzen (Arrow heads), die Straußeneischalen (OES), die Dechsel (Adzes) und Mahlsteine (Grinding stones) für die ein bimodales Verteilungsmuster erkennbar ist.

Für den HYDRO-Index ergibt sich ein vergleichbares Bild (Abb. 6-7). Auch hier ist die statistische Aussagekraft gegenüber den mittelholozänen Fundplätzen gegeben. Hier treten jedoch andere Inventare statistisch hervor: Rohmaterial (Blank production), Werkzeuge (Tools), Pfeilspitzen (Arrow heads), Straußeneischalen (OES), Dechsel (Adzes) und Mahlsteine (Grinding Stones).

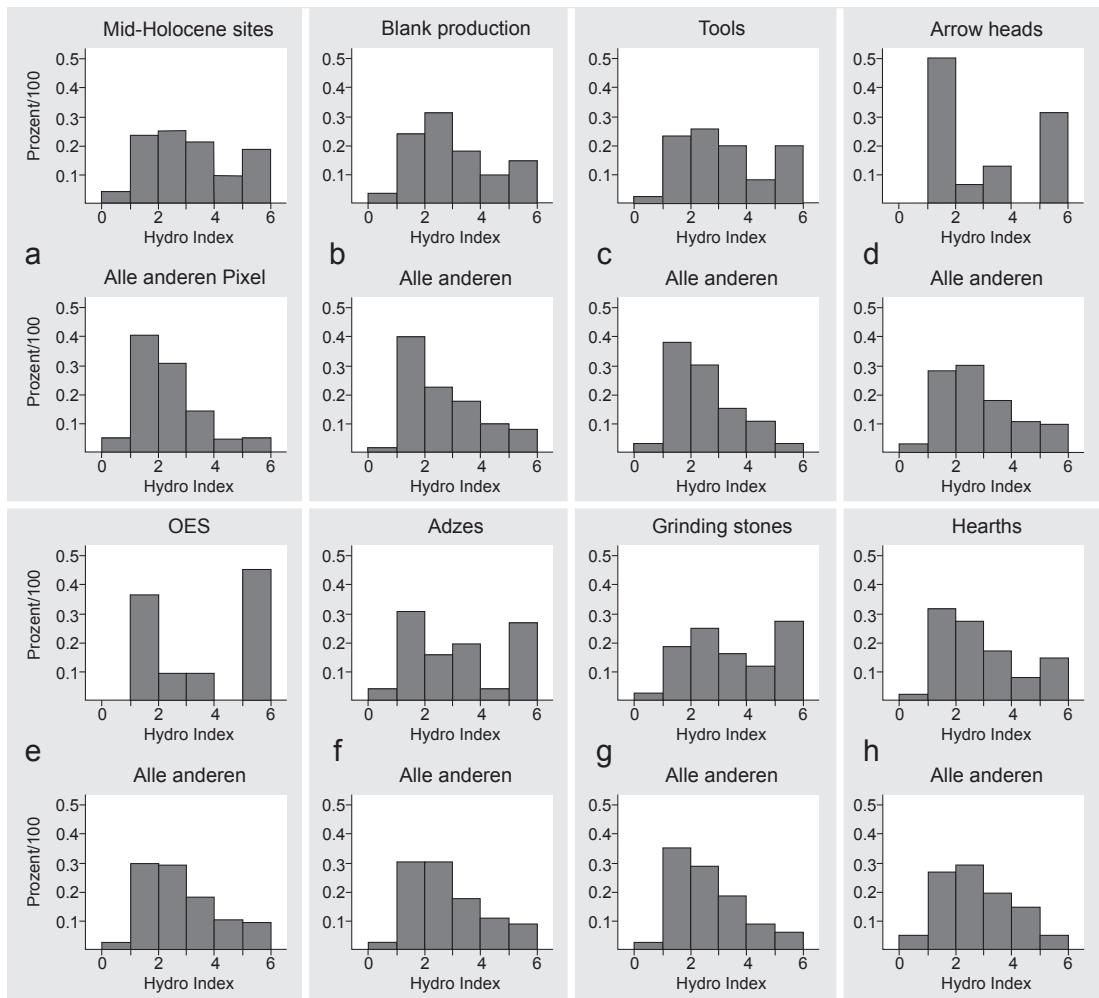


Abb. 6-7: Häufigkeitsdiagramme zum HYDRO-Index. Dargestellt ist der normierte HYDRO-Index (0-6) gegenüber einer anderen Variablen. Gruppe (a): alle mittelholozänen Fundplätze und alle anderen Pixel. Gruppen (b) bis (h): alle Inventare und jeweils alle anderen Fundplätze, die das Inventar nicht enthalten. Die Balken ergeben kumuliert jeweils den Wert 1. Weitere Informationen im Text. (verändert nach Bolten et al. in press) (für Abkürzungen der archäologischen Parameter vgl. Tab. 6-2)

Ausgehend von Auswertung der Fundplätze hinsichtlich ihrer Entfernung zur nächsten Drainagelinie können in den Vorkommen Fundplätze, die weiter weg und höher liegen von denjenigen getrennt werden, die nahe an Drainagelinien und tief liegen (Abb. 6-8). Erstere umfassen vor allem Rohmaterial und Feuerstellen. Bei letzteren finden sich bevorzugt Werkzeuge und Mahlsteine.

Abbildung 6-9 zeigt ein Biplot, aufgebaut aus den ersten beiden Hauptachsen (Achse 1 und 2, die stark mit den Achsen TOPO und HYDRO korrelieren. Die Gesamtvarianz der Daten wird dadurch sehr gut beschrieben.). Die beiden Parameter TOPO und HYDRO zeigen eine starke Unterschiedlichkeit. Dies ist weniger überraschend denn zu erwarten, da die Reliefposition *hoch* im Gegensatz zu einem *hohen* HYDRO-Index-Wert steht (Ein *niedriger* TOPO-Wert bedeutet dabei natürlich nicht gleichzeitig einen

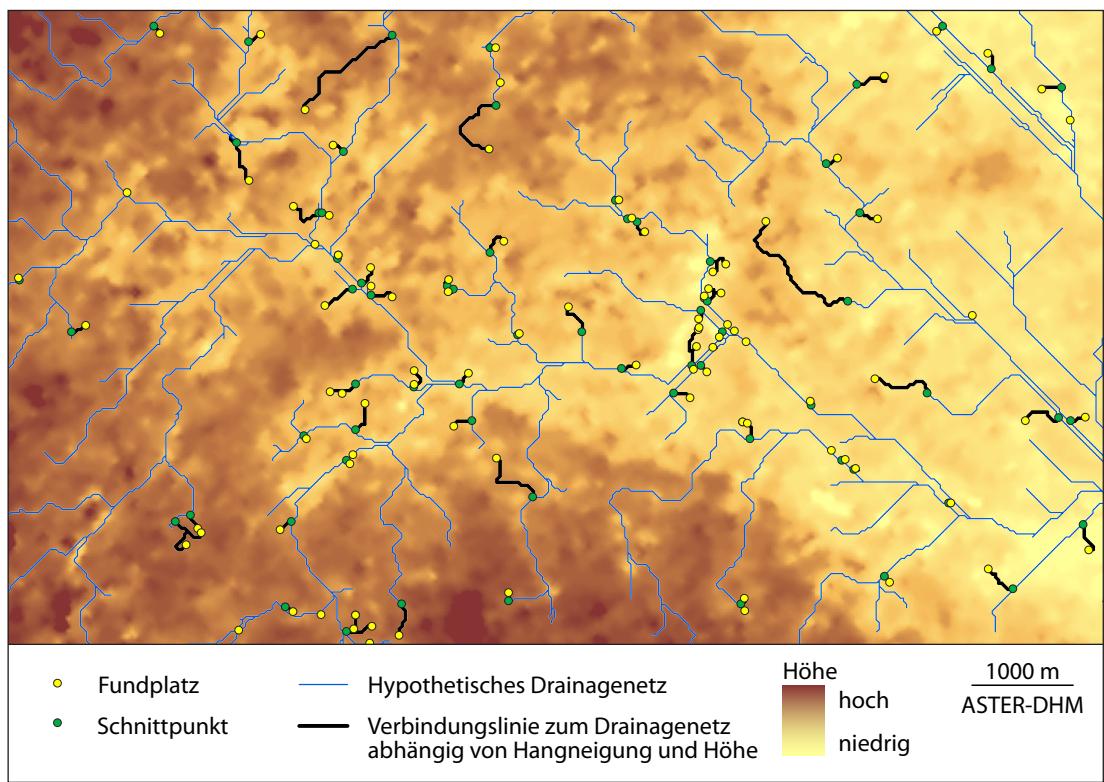


Abb. 6-8: Ausschnitt aus der Untersuchungsregion Djara, die den Zusammenhang zwischen der Lage der Fundplätze und der günstigsten Verbindung zur Drainagelinie in Abhängigkeit von der Hangneigung zeigt (negative Hangneigung wird bevorzugt). Bei Fundplätzen, die weiter weg von einer Drainagelinien und höher liegen, werden eher Rohmaterial und Feuerstellen gefunden. Bei Fundplätzen, die tiefer und näher an einer Drainagelinie liegen, finden sich bevorzugt Werkzeuge und Mahlsteine. (eigener Entwurf)

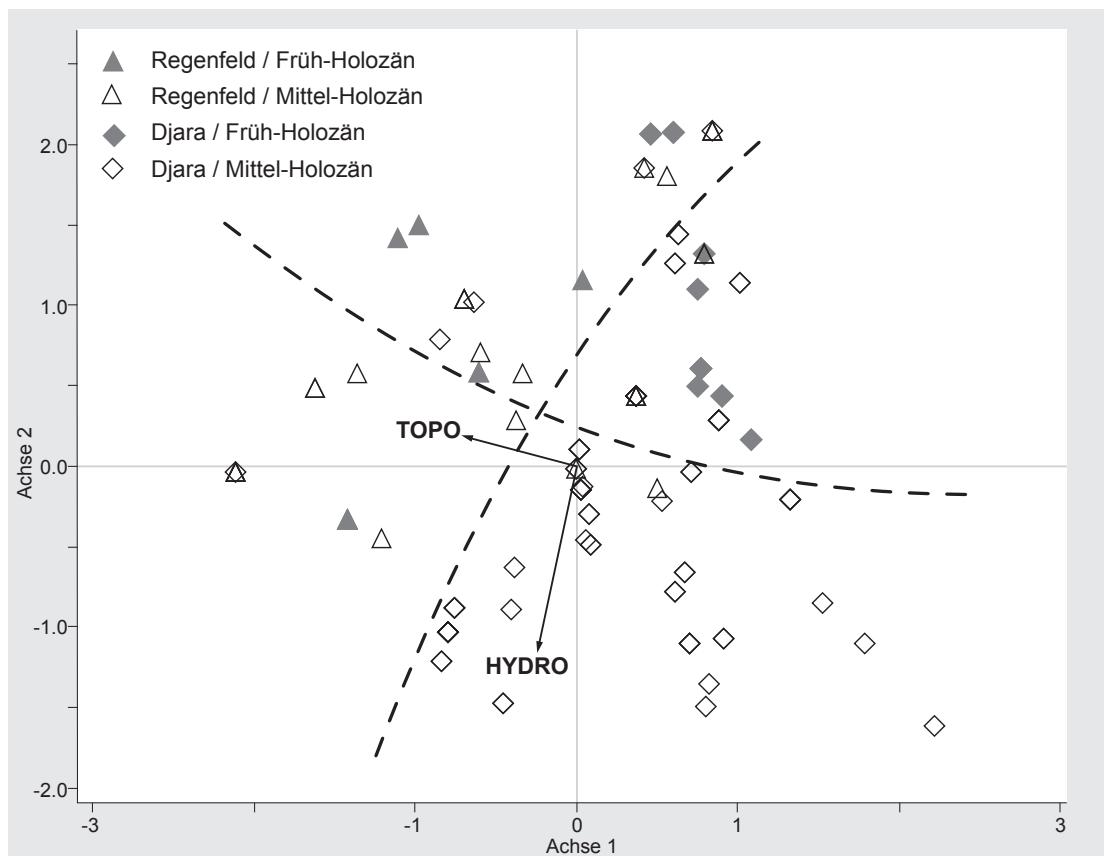


Abb. 6-9: Biplot, das den Zusammenhang zwischen HYDRO- und TOPO-Index und der Zeitstellung der Fundregionen verdeutlicht. Weitere Informationen im Text. (verändert nach BOLLEN ET AL. in press)

hohen HYDRO-Wert. Aus diesem Grund sind die beiden Parameter auch nicht vollkommen unkorreliert; vgl. Kap. 4.4.). Trägt man zusätzlich die Zeitstellungen der beiden Fundregionen auf, so werden mehrere Sektoren deutlich erkennbar (Abb. 6-9), die Hinweise auf das Nutzungspotential der Landschaft geben können:

Der TOPO-Index teilt die beiden Fundregionen auf, was aufgrund der unterschiedlichen geomorphologischen Ausstattung der Regionen wenig überraschend erscheint, aber gut in den statistischen Daten wieder zu finden ist. Der HYDRO-Index teilt vor allem die *Djara*-Region in zwei Zeitstellungen auf. Dies lässt sich so interpretieren, dass im Frühholozän die menschliche Besiedlung auf die Hochflächen konzentriert war. Hier herrschten eine geringe Vegetation und gute Jagdmöglichkeiten vor. Später im Mittelholozän konzentrierte sich die Aktivität näher zu den temporären Wasserstellen in tieferen Rieliefpositionen.

Somit können folgende Ergebnisse aus der Biplot-Darstellung und den Häufigkeitsdiagrammen gewonnen werden, die sich in Methode und Inhalt aufteilen lassen.

Methode:

- Es kommt zu einer Aufspaltung der Parameter in einer Weise, dass Abhängigkeiten zwischen geowissenschaftlichen Daten und den Funddaten existieren.
- Es besteht in den vorliegenden Fällen keine Unabhängigkeit zwischen archäologischen Funden und dem Fundort in der Landschaft.

Inhalt:

- Die unterschiedliche archäologische Ausstattung der Fundregionen spiegelt sich in Nutzung bestimmter Reliefpositionen wider (TOPO-Index).
- Die zeitliche Trennung der Datierungen der Funddaten spiegelt sich in einer Landnutzungsänderung wider. Die Reliefposition der Funde ändert sich zwischen dem Früh- und Mittelholozän.
- Die weiteren Fundplatzdaten reagieren unterschiedlich auf die Parameter HYDRO und TOPO. Gerade der TOPO-Index teilt das Fundinventar in zwei Gruppen auf.

- Der Geländeeindruck der Verknüpfung von Reliefposition und der Präsenz von archäologischen Fundstücken kann statistisch bestätigt und auf das Fundinventar erweitert werden.
- Die Ergebnisse lassen sich in die archäologische Forschung einbinden und führen hier zu weitergehenden Fragestellungen bezüglich der Ausstattung der Fundplätze und ihrer Lage in der Landschaft.

Offen bleibt die Problematik Gegenprobe, somit die Analyse der archäologisch fundleeren Räume. Die inhaltlichen Ergebnisse zeigen für die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungsräume den Zusammenhang zwischen Relief und archäologischen Funden, können jedoch keine Wahrscheinlichkeiten angeben, mit der an einer bestimmten Reliefposition archäologische Funde wirklich vorhanden sind. Es gibt somit offensichtlich weitere Parameter, die unabhängig von der Reliefposition das Vorkommen und die Ausstattung einer Fundregion steuern. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf, der bspw. die Einbeziehung des Faktors *Mensch* stärker berücksichtigt.

7. Synthese – holozäne Nutzungspotentiale der Western Desert Ägyptens

Beide Regionen stellen jeweils nur einen Nadelstich in die Landschaft der Western Desert dar, sind jedoch aufgrund ihrer unterschiedlichen naturräumlichen Ausstattung als Testregionen gut geeignet. Für eine Regionalisierung gemäß Abbildung 2-5 sind jedoch die Ergebnisse zusätzlicher Regionen notwendig. Aufgrund weiterer Informationen können jedoch räumliche Hypothesen aufgestellt werden.

BUBENZER & RIEMER (2007b) und BOLTEN & BUBENZER (2007) präsentieren für die Western Desert Ägyptens bedeutende Fundregionen, deren Einzugsgebiete und ihre geomorphologischen und geologischen Gunstfaktoren, so wie sie sich im Gelände darstellen (vgl. Abb. 7-1). Auf Grundlage dieser Daten können gezielt weitere Regionen mit der in dieser Arbeit vorgestellten Methode untersucht werden. Die geowissenschaftlichen Parameter liegen für diese Gebiete entsprechend Kapitel 6.2.1 vor und können mit den archäologischen Daten verglichen werden. Diese liegen jedoch zum Teil noch nicht in der Aufbereitungsform entsprechend Kapitel 6.2.2 vor oder sind noch nicht abschließend analysiert.

Mit Hilfe der Eigenschaftstabelle in Abbildung 7-1 kann jedoch auf Regionen geschlossen werden, die ähnliche geomorphologische und geologische Gunstfaktoren aufweisen und damit auch ähnliche Hinweise zum Nutzungspotential liefern können. Im Rahmen einer weiteren Untersuchung bieten sind die Regionen *Abu Gerara* und *Chufu* als Ergänzungsräume zu *Djara* und *Willmanns Camp* als Ergänzungsräum zu *Regenfeld* an. Aufgrund der räumlichen Nähe der Regionen bietet sich eine Trennung in einen West- und Ostbereich hinsichtlich ihrer holozänen Nutzungspotentiale an (vgl. Abb. 7-1). Die räumliche Trennung entspricht einer Trennung der Räume in Gebiete mit ständiger Wasserverfügbarkeit in Reichweite (für den prähistorischen Menschen in kurzer Zeit erreichbar) und grundwasserisolierter Gebiete, die zum Überleben andere Landnutzungsstrategien voraussetzen (vgl. RIEMER in press).

Für den Gesamtraum der Western Desert kann ausgehend von den Ergebnissen der Fallstudien festgehalten werden, dass das Nutzungspotential für den holozänen Menschen der isolierten Räume gegenüber den mit ständiger Wasserversorgung in Reichweite befindlichen Räume, ein anderes war; diese Räume ausgehend von der statistischen Verteilung der Lage der Funde unterschiedlich sind. Einzelne Fundkategorien reagieren unterschiedlich auf die geowissenschaftlichen Parameter und zeigen

so die unterschiedliche Nutzung der jeweiligen Räume an. Der im Gelände vermutete Zusammenhang zwischen der topographischen Lage und dem Fundplatz kann statistisch auf die Ausstattung des Fundplatzes ausgedehnt werden.

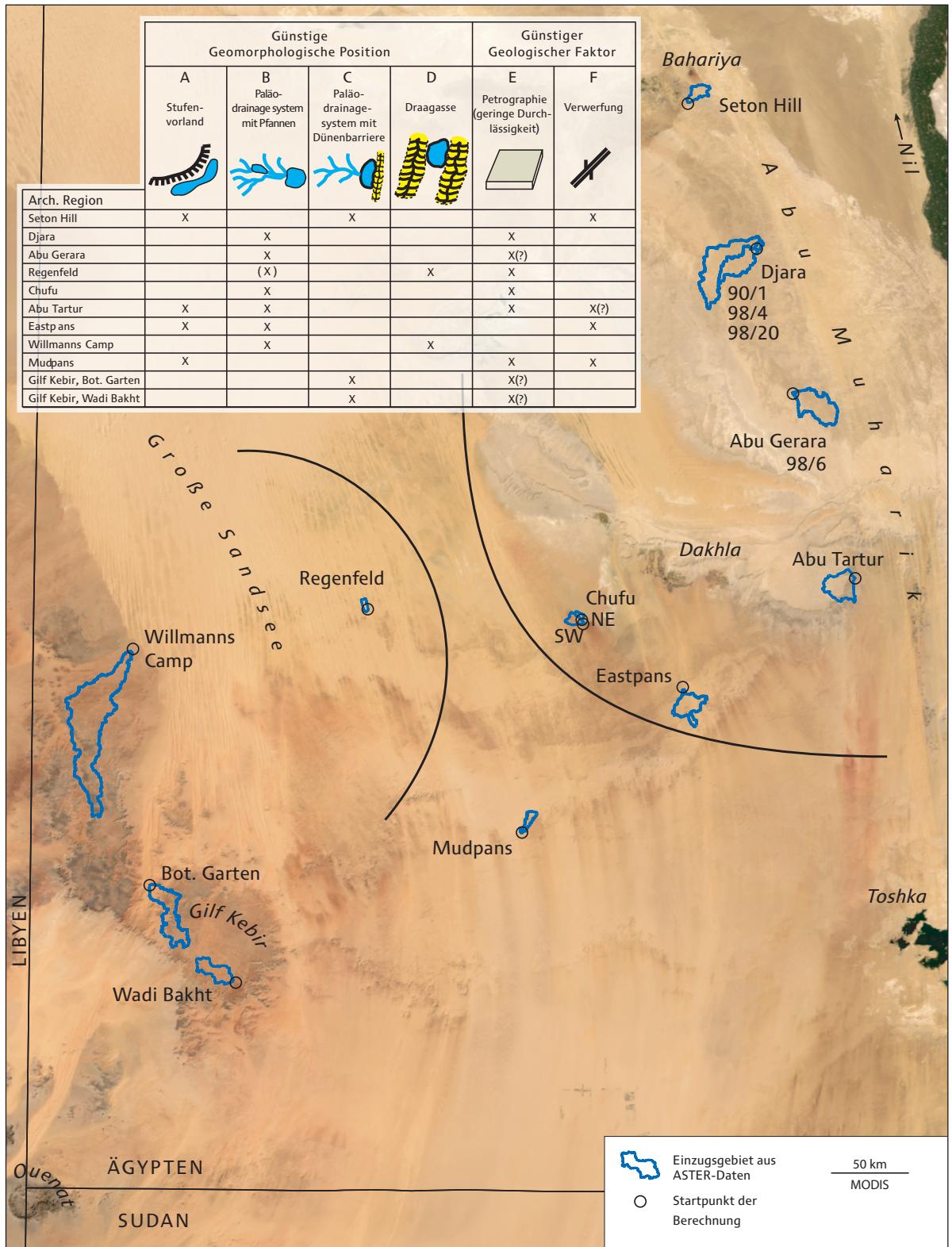


Abb. 7-1: Karte der bedeutenden Fundregionen in der Western Desert Ägyptens, die für weitere Untersuchungen in Frage kommen. Aus Geländebefunden sind in der Tabelle die jeweiligen Gunstfaktoren der Landschaft zusammengetragen. Weitere Informationen im Text. (verändert nach BOLLEN & BUBENZER 2007).

Für beide Regionen scheint sich auch durch die vorliegende Arbeit zu bestätigen, dass durch den Klimawandel innerhalb des Holozäns, mit zunehmender Trockenheit, einzelne Räume innerhalb der bevorzugten Regionen weniger durch den Menschen genutzt wurden und sich die nutzbaren Räume somit in ihrer Fläche verkleinerten.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Die hyperaride und weitgehend vom Menschen unveränderte Western Desert Ägyptens ist ein Hauptuntersuchungsgebiet des interdisziplinär angelegten Sonderforschungsbereichs 389 *Kultur- und Landschaftswandel im ariden Afrika: Entwicklungsprozesse unter ökologischen Grenzbedingungen* (ACACIA) und bietet somit ein ideales Feld zur Entwicklung und Prüfung neuer Methoden. Mit dieser Arbeit sind erstmalig flächenhafte digitale Höheninformationen in hoher Auflösung für das Untersuchungsgebiet abgeleitet, aufbereitet und hinsichtlich ihrer Qualität und Einsatzmöglichkeiten untersucht worden. Dabei konnten über die Fragestellung der Arbeit hinaus weitere Einsatzmöglichkeiten zur Beantwortung geomorphologischer und geoarchäologischer Fragestellung herausgearbeitet werden. Die Sandmassenabschätzung, die Ableitung eines Paläo-Höhenmodells zur Unterstützung der Sandquellenanalyse und die Ableitung von Paläodrainageystemen sowie die Analyse eines rezenten Weidemanagements sind nur einige Beispiele.

Beide Höhenmodelle (ASTER / SRTM-3) zeigen für die jeweilige Auflösung geringe Fehler, sie unterscheiden sich jedoch hinsichtlich ihres nutzbaren Maßstabsbereiches. Hier konnte eine Trennung im Bereich von ca. 1:100.000 festgelegt werden. Während die SRTM-3-Daten durch ihre flächenhafte Verfügbarkeit für großräumige Fragestellungen geeignet sind, fallen die ASTER-Höhendaten in den chorischen Maßstabsbereich und eignen sich besonders zur Beantwortung regionaler Fragestellungen. Die abgeleiteten methodischen Ergebnisse zum Einsatz und der Überprüfung der Höhendaten können problemlos auf andere aride Räume übertragen werden.

Die holozäne Nutzungspotential-Analyse kann als Disziplin innerhalb der Landschaftsökologie eingeordnet werden und projiziert die Fragestellungen der rezenten Analyse zum Potential einer Landschaft in die Vergangenheit. Der interdisziplinäre Aufbau ist dabei – wie allgemein bei Forschungen zur Landschaftsökologie – bindend und wird in der vorliegenden Arbeit in der Aufbereitung archäologischer Daten und der übergeordneten Fragestellung nach dem holozänen Kultur- und Landschaftswandel deutlich. Die genutzte chorische Maßstabsebene verbindet die Möglichkeit der flächenhaften digitalen Reliefanalyse durch ASTER-Höhendaten mit der genauen Beschreibung einer archäologischen Fundregion indem sich beide Methoden von zwei Maßstabsseiten annähern.

Zur Ableitung holozäner Nutzungspotentiale wurde ein offenes Modell entwickelt, das die spezielle Fragestellung aufgreift, jedoch ebenfalls mit anderen Datensets nutzbar ist. Es beinhaltet die Verknüpfung geomorphometrischer mit anderen räumlichen Daten in einem statistischen Verfahren. Die kanonische Korrespondenzanalyse wurde dabei als geeignetes statistisches Verfahren vorgestellt, um ein solches Datenset zu analysieren und einen Mehrwert an Information aus den Einzeldaten abzuleiten. Es hat sich gezeigt, dass in der vorliegenden Untersuchung statistisch eine Aufspaltung der Kombinationsdaten gegenüber einer zufälligen Verteilung nachzuweisen ist. Dieses Methodenset ist problemlos auf andere aride Räume übertragbar. Probleme der Interoperabilität konnten durch die möglichst vollständige Datenaufbereitung innerhalb der Fachdisziplinen vermieden werden. Dabei liegt die Datenaufnahme und –verarbeitung der Rohdaten in der Hand der jeweiligen Fachwissenschaftler. Für das holozäne Nutzungspotential der Western Desert konnten durch die Untersuchung zweier archäologischer Fundregionen verschiedene Erkenntnisse gewonnen werden. So ist zeitlich synchron mit einer hygrischen Klimaveränderung zwischen dem Früh- und Mittelholozän von einer veränderten Nutzung der Landschaft durch den Menschen auszugehen. Die Fundposition und das Fundinventar ändert sich hinsichtlich der Lage zur Topographie und zum potentiellen Wasservorkommen. Vergleichbar durchgeführte Studien zu anderen aufgeführten Fundregionen bieten sich daher an, um eine Regionalisierung der gewonnenen Erkenntnisse auf die ganze Western Desert Ägyptens zu ermöglichen. Durch die Einbeziehung weiterer geomorphologischer Hinweise konnten hier erste Hypothesen zur großräumigen Aufteilung der Western Desert aufgestellt werden.

Somit gibt die vorliegende Arbeit für zukünftige Forschungsprojekte wichtige Hinweise für ein mögliches methodisches Vorgehen, gerade im Sinne der interdisziplinär zu bearbeitenden Forschungsfelder, die es im Rahmen der Geomorphologie, Geomorphometrie und Geoarchäologie in Zukunft zu untersuchen gilt.

9. Literaturverzeichnis

- ABRAMS, M. (2000): The Advance Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform. *International Journal of Remote Sensing* 21: 847-859.
- ADAMS J.M. & FAURE, H. (Hrsg.) (1997): QEN members. Review and Atlas of Palaeo-vegetation: Preliminary land ecosystem maps of the world since the Last Glacial Maximum. Oak Ridge National Laboratory, TN, USA, 1999. [<http://www.esd.ornl.gov/projects/qen/adams1.html>].
- ALAILY, F. (1993): Soil association and land suitability maps of the western desert, SW Egypt. In: MEISSNER, B. & WYCISK, P. (Hrsg.): Geopotential and ecology – Analysis of a Desert Region. *Catena Suplement* 26: 100-123.
- ALAILY, F. (2007): Soil patterns and lnd use potential in the central Eastern Sahara, southwestern Egypt. In: BOLLIG, M., BUBENZER, O., VOGELSANG, R. & WOTZKA, H.-P. (Hrsg.): Aridity Change and Conflict in Africa. *Colloquium Africanum* 2. Köln, Heinrich-Barth-Institut. 35-51.
- ALMEIDA-FILHO, R., MOREIRA, F. R. S. & BEISL, C. H. (2005): The Serra da Cangalha as trobleme as revealed by ASTER and SRTM orbital data. *International Journal of Remote Sensing* 26: 833-838.
- ARAI, K. (1999): Preliminary vicarious calibration for EOS-AM1 / ASTER with field campaigns. *Advances in space research* 23: 1449-1457.
- ARAI, K. (2001): Early results from the vicarious calibration of Terra/ASTER/SWIR. *Advances in space research* 28: 77-82.
- ARAI, K. & TOMOOKA, H. (2005): Radiometric Performance Evaluation of ASTER VNIR, SWIR, and TIR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 43: 2725-2732.
- ASTER pricing (2007): http://lpdaac.usgs.gov/aster/aster_pricing.asp. (12.12.2007).
- ASTER User Guide (2007): Version 3. 1: <http://www.science.aster.ersdac.or.jp/en/documents/index.html>. (12.12.2007).
- AUTH, G. (2004): Prozessorientierte Organisation des Metadatenmanagements für Data-Warehouse-Systeme. Books on demand, Norderstedt. 285 Seiten.
- BAHRENBERG, G., GIESE, E. & NIPPER, J. (1990): Statistische Methoden in der Geographie. B.G. Teubner, Stuttgart: 449 Seiten.

- BAILY, J. (2001): Using ArcCatalog. Redlands.
- BAJA, S., CHAPMAS, D. M., & DRAGOVICH, D. (2002): Using Gis-based continous methods for assessing agricultural land-use potential in sloping areas. Environment and Planning B: Planning and Design 29: 3-20.
- BAMLER, R. (1999): The SRTM-Mission: A world-wide 30 m resolution DEM from SAR interferometry in 11 days. In: FRITSCH, D. & SPILLER, R. (Hrsgb.): Photogrammetrische Woche 1999. Wiechmann Verlag, Heidelberg: 145-154.
- BARSCH, D. & DIKAU, R. (1989): Entwicklung einer digitalen geomorphologischen Basis-karte. Geo-Informations-Systeme 3: 12-18.
- BARSCH, D. & LIEDTKE, H. (Hrsgb.) (1980): Methoden und Anwendbarkeit geomorphologischer Detailkarten. Beiträge zum GMK-Schwerpunktprogramm II. Selbstverlag des Institutes für Physische Geographie der Freien Universität Berlin. 104 Seiten
- BASTIAN, O., & STEINHARDT, U. (2002): Development and perspectives of landscape ecology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 498 Seiten.
- BAULIG, H. (1959): Morphometrie. Annales de Geographie 68: 385-409.
- BERNHARDSEN, T. (1999): Geographic information systems. Wiley, New York. 372 Seiten.
- BESLER, H. (1997): Periods of aeolian activity and stability in the Great Sand Sea in Egypt. Zentralblatt Geologie Paläontologie, Teil I: 23-39.
- BESLER, H. (1992): Geomorphologie der ariden Gebiete. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt. 189 Seiten.
- BESLER, H. (1997): Aktuelle und Paläoformung in der Großen Sandsee Ägyptens. Erste Ergebnisse aus dem Kölner SFB 389. Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl. 111: 1-16.
- BESLER, H. (2000): Modern and palaeo-modelling in the Great Sand Sea of Egypt (initial results from the Cologne Cooperative Research Project 389). Global and planetary change. 26: 13-24.
- BESLER, H. (2002): The Great Sand Sea (Egypt) during the late Pleistocene and the Holocene. Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl. 127: 1-19.
- BESLER, H. (2006): Sand sources of the Great Sand Sea (Egypt) according to sedimentological analysis. Zentralblatt Geologie Paläontologie, Teil I, 2004: 69-83.

- BESLER, H. (in press): The Great Sand Sea in Egypt, Formation, Dynamics and Environmental Change – A Sediment-Analytical Approach. *Developments in Sedimentology* 59. Elsevier, Amsterdam. 300 Seiten.
- BLASIUS, J. (2001): Korrespondenzanalyse. Oldenbourg, München. 377 Seiten. Zgl. Habilitationsschrift an der Universität zu Köln. Wirtschafts- und Sozialwissenschaftliche Fakultät.
- BLUMBERG, D. G. (2006): Analysis of large aeolian (wind-blown) bedforms using Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) digital elevation data. *Remote Sensing of Environment* 100 179-189.
- BLUMBERG, D. G., NETA, T., MARALIT, N., LAZAR, M. & FREILIKHER, V. (2004): Mapping exposed and buried drainage systems using remote sensing in the Negev Desert, Israel. *Geomorphology* 61: 239-250.
- BOLCH, T. & KAMP, U. (2003): Qualitätsanalyse digitaler ASTER-Geländemodelle von Hochgebirgsregionen / 14th Int. Conf. on Engineering Surveyin (Cerro Sillajhuay, Chile/Bolivien). *Kartographische Nachrichten* 5: 224-230.
- BOLLIG, M., BUBENZER, O. & MÖHLIG, W. (in press): African Landscapes – Interdisciplinary Approaches. Springer, New York. 410 Seiten.
- BOLTEN, A. & BUBENZER, O. (2006): New Elevation Data (SRTM/ASTER) for Geomorphological and Geoarchaeological Research in Arid Regions. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Suppl. 142: 265-279.
- BOLTEN, A. & BUBENZER, O. (2007): Watershed analysis in the Western Desert of Egypt. In: BUBENZER, O., BOLTEN, A. & DARIUS, F. (Hrsgb.): *Atlas of Cultural and Environmental Change in Arid Africa*. Heinrich-Barth-Institut e.V., Köln: 22-23.
- BOLTEN, A. & BUBENZER, O. (in press): Digital elevation models and watershed analysis on the base of satellite and radar data. In: BESLER, H. (Hrsgb.): *The Great Sand Sea in Egypt, Formation, Dynamics and Environmental Change – A Sediment-Analytical Approach*. *Developments in Sedimentology* 59. Elsevier, Amsterdam.
- BOLTEN, A., BUBENZER, O. & DARIUS, F. (2006): A digital elevation model as a base for the reconstruction of Holocene land-use potential in arid regions. *Geoarchaeology*. 21: 751-762.
- BOLTEN, A., BUBENZER, O., DARIUS, F., & KINDERMANN, K. (in press): Towards a Recon-

- struction of Land Use Potential. Case Studies from the Western Desert of Egypt. In: BOLLIG, M., BUBENZER, O. & MÖHLIG, W. (Hrsg.): Principles and methods in landscape ecology. Springer, Dordrecht.
- BOMBIK, J., JAHN, E., PHILIPP, C. & SIEMS, H. (2002): Korrespondenzanalyse - Theoretische Grundlagen und die Anwendung in SPSS. Präsentation und Handout. <http://helge-siems.de/mafo/index.htm>.
- BORNKAMM, R. & DARIUS, F. (1999): Probleme der Landnutzungsplanung in der Extremwüste Süd-Ägypten. *TU International* 46/47: 39-42.
- BORNKAMM, R. & KEHL, H. (1990): The plant communities of the Western Desert of Egypt. *Phytocoenologia* 19: 149-231.
- BORNKAMM, R., SPRINGUEL, I., DARIUS, F., SHEDED, M. G. & RADI, M. (2000): Some observations on the plant communities of Dungul Oasis (Western Desert, Egypt). *Acta Botanica Croatica* 1: 101-109.
- BRONNER, R., DOBROV, I. & MATIASKE, W. (1991): Die Korrespondenzanalyse in der Praxis der Datenauswertung. Universität Paderborn, Paderborn. 38 Seiten.
- BROOK, G. A., Embabi, N. S., Ashour, M. M., Edwards, R. L., Cheng, H., Cowart, J. B. & Dabous, A. A. (2003): Quaternary environmental change in the Western Desert of Egypt: Evidence from cave speleothems, spring tufas, and playa sediments (with 10 figures and 5 tables). *Zeitschrift für Geomorphologie*, Suppl. 131: 59-87.
- BROOKES, I. A. (1989): Early Holocene basinal sediments of the Dakhleh Oasis Region, South central Egypt. *Quaternary Research* 32: 139-152.
- BRÜCKNER, H. (2006): Holozäne Umweltrekonstruktion und Geoarchäologie. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Suppl. 148: 55-58.
- BRÜCKNER, H. & GERLACH, R. (2007): Geoarchäologie. In: H. Gebhardt, R. Glaser, U. Radtke & Reuber, P. (Hrsg.): *Geographie*. Elsevier, München: 513-516
- BRUNOTTE, E., GEBHARDT, H., MEURER, M., MEUSBURGER, P. & NIPPER, J. (Hrsg.): (2002): Lexikon der Geographie: in vier Bänden. Spektrum, Akad. Verl. Heidelberg.
- BUBENZER, O. & BESLER, H. (2005): Human Occupation of Sand Seas during the Early and mid-Holocene Examples from Egypt. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Suppl. 138:153-165.
- BUBENZER, O. & BOLTEN, A. (2003): Detecting Areas with different Land Use Potential.

- ArcNews Summer 2003: 13-14.
- BUBENZER, O. & BOLTEN, A. (in press a): The use of new elevation data (SRTM/ASTER) for the detection and morphometric quantification of Pleistocene megadunes (draa) in the eastern Sahara and the southern Namib. *Geomorphology*.
- BUBENZER, O. & BOLTEN, A. (in press b): Reconstructing palaeo-drainage systems by digital elevation data. In: BESLER, H. (Hrsgb.): *The Great Sand Sea in Egypt, Formation, Dynamics and Environmental Change – A Sediment-Analytical Approach. Developments in Sedimentology 59*. Elsevier, Amsterdam.
- BUBENZER, O., BOLTEN, A. & DARIUS, F. (2007a): *Atlas of Environmental Change and Human Adaptation in Arid Africa*. Heinrich-Barth-Institut e.V., Köln. 240 Seiten, Bildteil und 60 Seiten Beiheft.
- BUBENZER, O., BOLTEN, A. & RITTER, M. (2007b): Scale-specific geomorphometry of arid regions – examples from the eastern Sahara. In: BOLLIG, M., BUBENZER, O., VOGELSANG, R. & WOTZKA, H.-P. (Hrsgb.): *Aridity Change and Conflict in Africa. Colloquium Africanum 2*. Köln, Heinrich-Barth-Institut. 17-34.
- BUBENZER, O. & HILGERS, A. (2003): Luminescence dating of Holocene playa deposits of the Egyptian Plateau, Western Desert, Egypt. *Quaternary Science Reviews* 22: 1077-1084.
- BUBENZER, O., HILGERS, A. & RIEMER, H. (2007c): Luminescence dating and archaeology of Holocene fluvio-lacustrine sediments of Abu Tartur, Eastern Sahara. *Quaternary Geochronology* 2: 314-321.
- BUBENZER, O., BÖDEKER, O. & BESLER, H. (2006): A transcontinental comparison between the southern Namib Erg (Namibia) and the southern Great Sand Sea (Egypt). *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie. Teil I*: 7-23.
- BUBENZER, O., BESLER, H. & HILGERS, A. (2007d): Filling the gap: OSL data expanding ^{14}C chronologies of Late Quaternary environmental change in the Libyan Desert. *Quaternary International*.
- BUBENZER, O. & RIEMER, H. (2007): Holocene climatic change and human settlement between the central Sahara and the Nile Valley: Archaeological and geomorphological results. *Geoarchaeology* 22: 607.
- CAMPBELL, J.B. (1996): *Introduction to remote sensing*. Guilford Press, New York: 620 Seiten.

- CAPOLINI, P., S. ANDRÉFOUET, C. R. & PAYRI, C. (2003): A comparison of Landsat ETM+, Spot HRV, Ikonos, ASTER and airborne MASTER data for coral reef habitat mapping in South Pacific islands. Canadian Journal of Remote Sensing 29: 187-200.
- CARATTI, J. F., NESSER, J. A. & MAYNARD, C. L. (2004): Watershed classification using canonical correspondence analysis and clustering techniques: A cautionary note. Journal of the American Water Resources Association 40: 1257-1268.
- CIGAR-CSI (2007): Consortium for Spatial Information. Consultative Group for International Agriculture Research (CGIAR). <http://www.cgiar.org>. (12.12.2007).
- CONOLLY, J. & LAKE, M. (2006): Geographical information systems in archaeology. Cambridge University Press, Cambridge. 338 Seiten.
- CRIPPEN, E., HOOK, S. & FIELDING, E. (2007): Nighttime ASTER thermal imagery as an elevation surrogate for filling SRTM DEM voids. Geographical research letters 34: L01302.
- CUARTERO, A., FELICISIMO, A. M. & ARIZA, F. J. (2004): Accuracy Of Dem Generation From Terra-aster Stereo Data. International Archives Of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences 35: 559-563.
- CUARTERO, A., FELICÍSMO, A. M. & ARIZA, F. J. (2005): Accuracy, reliability, and depuration of SPOT HRV and Terra ASTER digital elevation models. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on 43: 404-407.
- CZEGKA, W., BEHREND, K. & BRAUNE, S. (2004): Die Qualität der SRTM-90m Höhen-daten und ihre Verwendbarkeit in GIS. (URL nicht mehr verfügbar).
- CZEGKA, W. & BRAUNE, S. (2005): SRTM-90m Höhendaten und ihre Verwendbarkeit in GeoInformations-Systemen in Hinblick auf Anwendungsmöglichkeiten in den Geo- und Umweltwissenschaften. Zeitschrift geologische Wissenschaft Berlin 33: 199-208.
- DÄRR (2007): http://www.daerr.de/Landkarten/Index_Landkarten.html?-session=shop:574E9B601b2031FC58UIGu30F9FF. (12.12.2007).
- DE NOBLE-DUCOUDRÉ, N., M. CLAUSSEN & C. PRENTICE (2000): Mid-Holocene greening of the Sahara: first results of the GAIM 6000 year BP Experiment with two asynchronously coupled atmosphere/biome models. Climate Dynamics 16: 643-659.
- DIKAU, R. (1996): Geomorphologische Reliefklassifikation und –analyse. Heidelberger

- Geographische Arbeiten 104: 15-23.
- DIKAU, R. (2006): Die Struktur der Erdoberfläche. Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl. 148: 6-13.
- DIKAU, R., BRABB, E., MARK, R. & PIKE, R. (1995): Morphometric landform analysis of New Mexico. Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl. 101: 109-126.
- DIKAU, R., MOLDENHAUER, K. & BEDEHASING, J. G. (2006): Die Erdoberfläche - Lebens- und Gestaltungsraum des Menschen. Forschungsstrategische und programmatische Leitlinien zukünftiger geomorphologischer Forschung und Lehre herausgegeben vom Deutschen Arbeitskreis für Geomorphologie. Gebrüder Borntraeger, Berlin. Zgl. Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl. 148. 149 Seiten.
- DIKAU, R. & SCHMIDT, J. (1999): Georeliefklassifikation. S. 217-244. In: SCHNEIDER-SLIWA, R., SCHAUB, D. & GEROLD, G. (Hrsg.): Angewandte Landschaftsökologie: Grundlagen und Methoden. Springer, Berlin. 559 Seiten.
- DLR (2005): Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Abdeckung der SRTM-X Daten. <http://www.dlr.de/srtm/neu/processing.htm> (10.08.2005). Diese Webseite ist nicht mehr verfügbar.
- DLR (2007): Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. http://www.dlr.de/iss/desktopdefault.aspx/tabcid-1412/2072_read-3536/. (12.12.2007).
- DONNER, J. (1998): The geology of a playa in Farafra. Western Desert of Egypt. Paleoenvironment of Africa 25: 121- 131.
- DURAM, L. A., BATHGATE, J. & RAY, C. (2004): A Local Example of Land-Use Change: Southern Illinois - 1807, 1938, and 1993. The Professional Geographer 56: 127-140.
- ECKERT, S., KELLENBERGER, T. & ITTEN, K. (2005): Accuracy assessment of automatically derived digital elevation models from aster data in mountainous terrain. International Journal of Remote Sensing 26: 1943-1957.
- EGYPTIAN GEOLOGICAL SURVEY (1981): Geologic Map of Egypt 1:2,000,000. Ministry of Industry and Mineral Resources, Kairo.
- EITEL, B., BLÜMEL, W. D. & HÜSER, K. (2004): Palaeoenvironmental transitions between 22 ka and 8 ka in monsoonally influenced Namibia. In: Smykatz-Kloss, W. & Felix-Henningsen, P. (Hrsg.): Palaeoecology of Quaternary Drylands. Lecture Notes in Earth Sciences 102: 176-194.

- EITEL, B., KADEREIT, A., BLÜMEL, W., HÜSER, K. & KROMER, B. (2005): The Amspoort Silts, northern Namib Desert (Namibia): Formation, age and palaeoclimatic evidence of river-end deposits. *Geomorphology* 64: 299-314.
- EITEL, B., KADEREIT, A., BLÜMEL, W., HÜSER, K., LOMAX, J. & HILGERS, A. (2006): Environmental changes at the eastern Namib Desert margin before and after the Last Glacial Maximum: New evidence from fluvial deposits in the upper Hoanib River catchment, northwestern Namibia. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology* 234: 201-222.
- EITEL, B. & MÄCHTLE, B. (2005): Holozäner Umweltwandel in der nördlichen Atacama und sein Einfluss auf die Nasca-Kultur (Südperu). *Geographische Rundschau* 58: 30-36.
- EL-BAZ, F. (2007): Radar images and geoarchaeology of the Eastern Sahara. In: WISEMAN, J., EL-BAZ, F. (Hrsgb.): *Remote Sensing in Archaeology*. Springer, New York: 47-69.
- EL-BAZ, F., MAINGUET, M., ROBINSON, C. (2000): Fluvio-aeolian dynamics in the north-eastern Sahara: the relationship between fluvial/aeolian systems and groundwater concentration. *Journal of Arid Environments* 44: 173-183.
- EMBABI, N. S. (2004): The geomorphology of Egypt landforms and evolution. Egyptian Geographical Society, Cairo. 447 Seiten.
- EOS (2007): Earth Observing System Data Gateway. <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>. (12.12.2007).
- EUMETSAT (2007): European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites. <http://www.eumetsat.int/Home/index.htm>.
- FARR, T. G., ROSEN, P. A., CARO, E., CRIPPEN, R., DUREN, R., HENSLEY, S., KOBRECK, M., PALLER, M., RODRIGUEZ, E., ROTH, L., SEAL, D., SHAFFER, S., SHIMADA, J., UMLAND, J., WERNER, M., OSKIN, M. (2007): The Shuttle Radar Topography Mission - RG2004. *Reviews of Geophysics* 45: 1-33.
- FGDC (2007): Federal Geographic Data Comitee. Geospatial Metadata Standrds. <http://www.fgdc.gov/metadata/geospatial-metadata-standards#isometadata>. (12.12.2007).
- FINSTERWALDER, S. (1890): Über den mittleren Böschungswinkel und das wahre Areal einer topographischen Fläche. *Sitzungsbericht - Bayerische Akademie der Wis-*

- senschaften Klasse 20. Naturwissenschaftliche Rundschau 27: 346-347.
- FRY, G., TRESS, B. & TRESS, G (2007): Integrative landscape research: facts and challenges. In: Wu, J. & Hobbs, R. J. (Hrsgb.): Key topics in landscape ecology. Cambridge University Press, Cambridge: 247-268.
- FU, B., NINOMIYA, Y., LEI, X., TODA, S. & AWATA, Y. (2004): Mapping active fault associated with the 2003 Mw 6.6 Bam (SE Iran) earthquake with ASTER 3D images. Remote Sensing of Environment 92: 153-157.
- FUJISADA, H. (1998): ASTER Level-1 Data Processing Algorithm. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 36: 1101-1112.
- FUJISADA, H., BAILEY, G. B., KELLY, G. G., HARA, S. & ABRAMS, M. J. (2005): ASTER DEM Performance. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 43: 2707-2714.
- GARBRECHT, J. & MARTZ, L. W. (2000): An automated digital landscape analysis tool for topographic evaluation, drainage identification, watershed segmentation and subcatchment parameterization TOPAZ user manual Ver. 3.1. USDA, Agricultural Research Service, Grazinglands Research Laboratory, El Reno.
- GARDNER, J. S. (1977): Physical geography. Harper's College Press, New York. 571 Seiten.
- GEBHARDT, H., GLASER, R., RADTKE, U. & REUBER, P. (2007): Geographie. Elsevier, Spektrum Akad. Verl, München. 1096 Seiten.
- GEHLEN, B., K. KINDERMANN, J. LINSTÄDTER & RIEMER, H. (2002): The Holocene Occupation of the Eastern Sahara: Regional Chronologies and Supra-regional Developments in four Areas of the Absolute Desert. In: JENNERSTR. 8 (Hrsgb.): Tides of the Desert – Gezeiten der Wüste. Contributions to the Archaeology and Environmental History of Africa in Honour of Rudolph Kuper. Africa Praehistorica 14: 85-116.
- GESCH, D.B. & LARSON, K. S. (1996): Techniques for development of global 1-kilometer digital elevation models. In: Pecora Thirteen. Human Interactions with the Environment - Perspectives from Space. Sioux Falls, South Dakota: 20-22.
- GIESSNER, K. (1981): Die Jungquartäre Klimageschichte der Sahara - Stand und Vergleich der bisherigen Forschungsergebnisse. Würzburger Geographische Arbeiten, 53: 111-127.

- GIESSNER, K. (1985): Klimageographie Nordafrika (Tunesien, Algerien). Afrika-Kartenwerk, Beiheft zu Blatt N5. Gebrüder Borntraeger, Berlin.
- GLCF (2007): Global Land Cover Facility. <http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml>. (12.12.2007).
- GOMEZ, C., DELACOURT, C., ALLEMAND, P. & LEDRU, P. W. R. (2005): Using ASTER remote sensing data set for geological mapping, in Namibia. Physics and Chemistry of the Earth 30: 97-108.
- GOODCHILD, M. F. (2000): Communicating Geographic Information in a Digital Age. Annals of the Association of American Geographers 90: 344-355.
- GOODCHILD, M. F. (2003): The nature and value of geographic information. In: DUCKHAM, M., GOODCHILD, M. & WORBOYS, M. (Hrsgb.): Foundations of Geographic Information Science. Taylor and Francis, New York: 19-32.
- GOODCHILD, M. F., EGENHOFER, M. J., KEMP, K. K., MARK, D. M., & SHEPPARD, E. (1999): Introduction to the Varenius project. International Journal of Geographical Information Science 13: 731-745.
- GUTH, P.L. (1995): Slope and aspect calculations on gridded digital elevation models: Examples from a geomorphic toolbox for personal computers. Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl. 101: 31-52.
- HAASE, G. (1996): Geotopologie und Geochorologie - Die Leipzig-Dresdener Schule der Landschaftsökologie. In: HAASE, G. & EICHLER, E. (Hrsgb.) Wege und Fortschritte der Wissenschaft; Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig. Akademie-Verlag, Berlin: 201-229.
- HAKE, G. & GRÜNREICH, D. (2002): Kartographie. de Gruyter, Berlin. 604 Seiten.
- HAMMOND, E. H. (1964): Analysis of properties in land form geography: An application to broad-scale land form mapping. Annales Association of American Geographers 54: 11-19 und map supplement 4.
- HARARI, Z. (1996): Ground-penetrating radar (GPR) for imaging stratigraphic features and groundwater in sand dunes. Journal of Applied Geophysics 36: 43-52.
- HAYNES, V.C. (1987): Holocene Migration Rates of the Sudano-Sahelian Wetting Front, Arba'in Desert, Eastern Sahara. In: Close, A.E. (ed.): Prehistory of Arid North Africa, Southern Methodist University Press, Dallas: 69-84
- HAYNES, C. V., EYLS, C. H., PAVLISH, L. A., RITCHIE, J. C. & RYBAD, M. (1989): Holocene

- Palaeoecology of the Eastern Sahara; Selima Oasis. Quaternary Science Reviews 8: 109-136.
- HDF (2007): The HDF Group. <http://www.hdfgroup.org/>. (12.12.2007).
- HERMINA, M., KLITZSCH, E. & LIST, F. K. (1989): Stratigraphic lexicon and explanatory notes to the geological map of Egypt 1:500 000. Conoco Inc., Cairo. 264 Seiten.
- HIRANO, A., WELCH, R. & LANG, H. (2003): Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 57: 356-370.
- HOBBS, R. & WU, J. (2007): Perspectives and prospects of landscape ecology. In: WU, J. & HOBBS, R. J. (Hrsgb.): Key topics in landscape ecology. Cambridge University Press, Cambridge: 3-10.
- HOELZMANN, P., KRUSE, H.-J. & ROTTINGER, F. (2000): Precipitation estimates for the eastern Saharan palaeomonsoon based on a water balance model of the West Nubian Palaeolake Basin. Global and Planetary Change 26: 105-120.
- HORMANN, K. (1968): Rechenprogramme zur morphometrischen Kartenauswertung. Geographisches Institut der Universität, Kiel. 154 Seiten.
- HUBBARD, B. E. & CROWLEY, J. K. (2005): Mineral mapping on the Chilean–Bolivian Altiplano using co-orbital ALI, ASTER and Hyperion imagery: Data dimensionality issues and solutions. Remote Sensing of Environment 99: 173-186.
- IPCC report (2007): Summary for Policymakers. <http://www.ipcc.ch/>. (12.12.2007).
- ISO 19115 (2007): Metadatenstandard z.B. http://www.giswiki.org/wiki/ISO_19115. (12.12.2007).
- IWASAKI, A. & FUJISADA, H. (2005): ASTER Geometric Performance. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 43: 2700-2707.
- IWASAKI, A. & OYAMA, E. (2005): Correction of Stray Light and Filter Scratch Blurring for ASTER Imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 43: 2763-2768.
- IWASAKI, A. & TONOOKA, H. (2005): Validation of a Crosstalk Correction Algorithm for ASTER/SWIR. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 43: 2747-2751.
- JÄKEL, D. & RÜCKERT, H. (1998): Recent rainfall distribution patterns of the Republic of Sudan as a model for rainfall variations in the past an climate-induced geomor-

- phological processes in Sahelian countries. In: HEINE, K. (Hrsgb.): Palaeoecology of Africa. 101-121 mit Karte.
- JAKSCH, C. (2001): Die jungquartäre Klimaentwicklung der östlichen Sahara. Köln, (unveröffentlichte Staatsexamensarbeit). 99 Seiten.
- JEIDA (2007): Japan Electronics and Information Technology Industries Association. Digital Still Camera Image File Format Standard (Exchangeable image file format for Digital Still Camera: Exif) <http://it.jeita.or.jp/document/publica/standard/exif/english/jeida49e.htm>. (12.12.2007).
- JONGMAN, R. H., TER BRAAK, C. J. F. & VAN TONGEREN, O. F. R. (1995): Data analysis in community and landscape ecology. Cambridge University Press, Cambridge; New York. 299 Seiten.
- JPL (2007a): Jet Propulsion Laboratory: ASTER Science Team. <http://asterweb.jpl.nasa.gov/science.asp>. (12.12.2007).
- JPL (2007b): Jet Propulsion Laboratory. <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>. (12.12.2007).
- KÄÄB, A., HUGGEL, C., PAUL, F., WESSELS, R., RAUP, B., KIEFFER, H. & KARGEL, J. (2002): Glacier monitoring from ASTER imagery: Accuracy and Applications. EARSeL Proceedings LIS-SIG Workshop, March 11-13.
- KÄÄB, A. (2005): Combination of SRTM3 and repeat ASTER data for deriving alpine glacier flow velocities in the Bhutan Himalaya. *Remote Sensing of Environment* 94: 463-474.
- KAMP, U., BOLCH, T. & OLSENHOLLER, J. (2003): DEM Generation from ASTER Satellite Data for Geomorphometric Analysis of Cerro Sillajhuay, Chile/Bolivia. *ASPRS 2003 Annual Conference Proceedings*.
- KAMP, U., BOLCH, T. & OLSENHOLLER, J. (2005): Geomorphometry of Cerro Sillajhuay (Andes, Chile/Bolivia): Comparison of Digital Elevation Modes (DEMs) from ASTER Remote Sensing Data and Contour Maps. *Geocarto International* 20: 23-33.
- KELLNDORFER, J., WALKER, W., PIERCE, L., DOBSON, C., FITES, J. A., HUNSACKER, C., VONA, J. & CLUTTER, M. (2004): Vegetation height estimation from Shuttle Radar Topography Mission and National Elevation Datasets. *Remote Sensing of Environment* 93: 339-358.
- KINDERMANN, K. (2003): Investigations at the Mid-Holocene Settlement Area of Djara

- (Abu Muhariq Plateau, Western Desert of Egypt). In: KRZYZANIAK, L., KROEPPER, K. & KOBUSIEWICZ, M. (Hrsgb.): Cultural Markers in the Later Prehistory of Northeastern Africa. Studies in African Archaeology. Proceedings of the international symposium, Poznan Archaeological Museum.
- KINDERMANN, K. & BUBENZER, O. (2007): Djara - humans and their environment on the Egyptian limestone plateau around 8,000 years ago. In: BUBENZER, O., BOLTEN, A. & DARIUS, F. (Hrsgb.): Atlas of Cultural and Environmental Change in Arid Africa. Heinrich-Barth-Institut e.V., Köln: 26-29.
- KINDERMANN, K., BUBENZER, O., NUSSBAUM, S., RIEMER H., DARIUS, F., PÖLLATH, N. & SMETTMAN, U. (2006): Paleoenvironment and Holocene land use of Djara, Western Desert of Egypt. Quaternary Science Reviews 25: 1619-1637.
- KLEEBERG, H. (1999): Hydrologie und Regionalisierung. Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992 bis 1998). Wiley-VCH, Weinheim. 477 Seiten.
- KLITZSCH, E., LIST, F.K., PÖHLMANN, G. HANDLEY, R. HERMINA, M. & MEISSNER, B. (1987): Geological Map of Egypt 1:500,000. Conoco, Egypt.
- KLITZSCH, E. & SCHANDELMEIER, H. (1990): South Western Desert. In: Said, R. (Hrsgb.): The Geology of Egypt. Balkema, Rotterdam: 249-258.
- KLITZSCH, E. & THORWEIHE, U. (1999): Nordost-Afrika Strukturen und Ressourcen: Ergebnisse aus dem Sonderforschungsbereich „Geowissenschaftliche Probleme in ariden und semiariden Gebieten“. Wiley-VCH, Weinheim. 676 Seiten.
- KOCH, A., HEIPKE, C. & LOHMAN, P. (2002): Bewertung von SRTM Digitalen Geländemodellen – Methodik und Ergebnisse. Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation 6: 389-398.
- KOCUREK, G. & EWING, R. (2005): Aeolian dune field self-organization – implications for the formation of simple versus complex dune-field patterns. Geomorphology 72: 94-105.
- KÖTHE, R. & LEHMEIER, F. (1993): SARA - Ein Programmsystem zur Automatischen Relief-Analyse. Standort - Zeitschrift für Angewandte Geographie 4: 11-21.
- KORSISTKA, C. (1858): Studien über die Methoden und Benützung hypsometrischer Arbeiten, nachgewiesen an den Niveauverhältnissen der Umgebung von Prag. Perthes, Gotha. 107 Seiten.
- KRAUS, K. (2004): Photogrammetrie. De Gruyter, Berlin: 516 Seiten.

- KRÖPELIN, S. (1989): Untersuchungen zum Sedimentationsmilieu von Playas im Gilf Kebir (Südwest-Ägypten). In: KUPER, R. (Hrsg.): Forschungen zur Umweltgeschichte der Ostsahara, Köln: 183-305.
- KUGLER, H. (1974): Das Georelief und seine kartographische Modellierung. Diss. B, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg [Unveröff.], Halle.
- KUPER, R. (1999): Auf den Spuren der frühen Hirten. Archäologie in Deutschland 2: 12-17.
- KUPER, R. (2007): Desert parks in the eastern Sahara. In: BUBENZER, O., BOLTEN, A. & DARIUS, F. (Hrsg.): Atlas of Cultural and Environmental Change in Arid Africa. Heinrich-Barth-Institut e.V., Köln: 118-121.
- KUPER, R. & KRÖPELIN, S. (2006): Climate-Controlled Holocene Occupation in the Sahara: Motor of Africa's Evolution. *Science* 313: 803-807.
- KUPER, R., MÖHLIG, W., BOLLIG, M. & BUBENZER, O. (2007): Environmental change and cultural history in northeastern and southwestern Africa. In: BUBENZER, O., BOLTEN, A. & DARIUS, F. (Hrsg.): Atlas of Cultural and Environmental Change in Arid Africa. Heinrich-Barth-Institut e.V., Köln: 8-11.
- KUTTER, A., NACHTERGAELE, F. O. & VERHEYE, W. H. (1997): The new FAO approach to land use planning and management, and its application in Sierra Leone. The ITC journal = Bulletin de l'ITC. 278 Seiten.
- LANCASTER, N. (1999): Geomorphology of desert sand seas. In: Goudie, A.S., Livingstone, I & Stokes, S., (Hrsg.): Aeolian environments, sediments and landforms. Wiley, Chichester: 49-69.
- LANCASTER, N., KOCUREK, G., SINGHVI, A., PANDEY, V., DEYNOUX, M., GHIENNE, J. & LO, K. (2002): Late Pleistocene and Holocene dune activity and wind regimes in the western Sahara Desert of Mauritania. *Geology* 30: 991-994.
- LATHAM, M. & DENIS, B. (1980): The study of land potential: an open-ended inquiry. In: Brookfield H.C. (Hrsg.): Population-environment relations in tropical islands: the case of eastern Fiji. UNESCO, Paris: 113-123.
- LESER, H. (2007): Landscape Ecology: A discipline or a field of transdisciplinary research and application? In: LÖFFLER, J. & STEINHARDT, U. (Hrsg.): Landscape Ecology. Colloquium Geographicum 28. Sankt Augustin: 48-62.
- LESER, H. & MOSIMANN, T. (1997): Landschaftsökologie: Ansatz, Modelle, Methodik,

- Anwendung. E. Ulmer, Stuttgart. 432 Seiten.
- LEVIN, N., BEN-DOR, E. & KARNIELI, A. (2004): Topographic information of sand dunes as extracted from shading effects using Landsat Images. *Remote Sensing of Environment* 90: 190-209.
- LIEBIG, W. (1999): Desktop-GIS mit ArcView GIS. Wichmann, Heidelberg. 340 Seiten.
- LIEBIG, W. (2006): ArcGIS-ArcView9 Personal-Geodatabase. Points Verlag Norden, Halmstadt. 132 Seiten.
- LIEDTKE, H. (1988): Untersuchungen zur Geomorphologie der Bundesrepublik Deutschland: Neue Ergebnisse der geomorphologischen Kartierung: Beiträge zum GMK-Schwerpunktprogramm VIII. Im Selbstverlag des Institutes für Physische Geographie der Freien Universität Berlin, Berlin. 225 Seiten.
- LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W. & CHIPMAN, J. W. (2004): *Remote sensing and image interpretation*. Wiley, New York. 763 Seiten.
- LINSTÄDTER, A. & BOLTER, A. (2006): Learning from the Himba Nomads. *Geographische Rundschau International* Edition 2: 21-27.
- LINSTÄDTER, J. & KRÖPELIN, S. (2004): Wadi Bakht revisited: Holocene climate change and prehistoric occupation in the Gilf Kebir region of the Eastern Sahara, SW Egypt. *Geoarchaeology* 19: 753-778.
- LIST, F. K., EL-GABY, S. & TEHRANI, R. (1989): The basement rocks in the Eastern and Western Desert and Sinai. In: HERMINA, M., KLITZSCH, E. & LIST, F. K. (Hrsg.): *Stratigraphic Lexicon and explanatory notes to the Geological Map of Egypt 1:500,000*. CONOCO, Cairo: 33-56.
- LÖFFLER, J. & STEINHARDT, U. (2007): *Landscape ecology*. Asgard-Verlag, Sankt Augustin. 62 Seiten.
- LVERM (2007a): Landesvermessungsamt NRW. <http://www.lverma.nrw.de/>. (12.12.2007).
- LVERM (2007b): (TRansformationen und ABBildungsübergänge) für 3D-Transformationen. http://www.lverma.nrw.de/produkte/programme/transformationen/TRABBI_3D.htm. (12.12.2007).
- MAASS, S., KREIL-SAUER, A. & SCHRÖDER, K. (1996): Metadaten - Schlüssel zur Nutzung von statistischen Informationssystemen, Diskussionspapier. <http://www.statistik.wiso.uni-erlangen.de/diskussionspapiere/d0012.pdf>. (12.12.2007).

- MAIDMENT, D. R. (2002): Arc hydro GIS for water resources. ESRI Press, Redlands. 203 Seiten.
- McCAULEY, J.F., SCHABER G.G., BREED, C.S., GROLIER, M.J., HAYNES JR., C.V., ISSAWI, B., ELACHI, C. & BLOM, R. (1982): Subsurface valleys and geoarchaeology of the eastern Sahara revealed by Shuttle radar. *Science* 218: 1004-1020.
- McCUNE, B. & MEFFORD, M. J. (1999): PC-ORD. Multivariate analysis of ecological data. Version 4.0. MjM Software, Gleneden Beach, Oregon, USA. 237 Seiten.
- McKEE, E.D. (1979): A Study of Global Sand Seas. US Geological Survey, Washington. 429 Seiten.
- MEADE, C. & SANDWELL, D. T. (1996): Perspective synthetic aperture radar for geodesy. *Science* 273: 1181-1182.
- MEISSNER, B. & RIPKE, U. (1993): Examples of Remote Sensing Cartography in Arid and Semiarid Regions. *Berliner geowissenschaftliche Abhandlungen. Reihe C* 14. FU Berlin. 265 Seiten.
- MEISSNER, B. & WYCISK, P. (Hrsgb.) (1993): Geopotential and Ecology – Analysis of a Desert Region. *Catena*, Suppl. 26: 199 Seiten.
- MESSERLI, B., GROSJEAN, M., HOFER, T., NUNEZ, L. & PFISTER, C. (2000): From nature-dominated to human-dominated environmental changes. *Quaternary science reviews* 19: 459-479.
- MILIARESIS, G.C. & PARASCHOU, C. (2005): Vertical accuracy of the SRTM DTED level 1 of Crete. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 7: 49-59.
- MILLER, C. L. & LAFLAMME, R. A. (1958): The digital terrain model - theory & application. M.I.T., Camebridge. 20 Seiten.
- MOORE, I.D., GRAYSON, R.B. & LADSON, A.R. (1991): Digital Terrain Modelling - A Review of Hydrological, Geomorphological and Biological Applications. *Hydrological processes* 5: 3-30.
- MOSIMANN, T. (2007): Einführung in die Landschaftsökologie: der ökologische Blick auf die Landschaft. In: Gebhardt H., Glaser, R., Radtke, U. & Reuber, P. (Hrsgb.): *Geographie*. Elsevier, München: 486-495.
- MÜLLER, J. & ZIMMERMANN, A. (1997): Archäologie und Korrespondenzanalyse Beispiele, Fragen, Perspektiven. Verlag Marie Leidorf, Espelkamp. 182 Seiten.

- MUNYIKWA, K. (2005) The role of dune morphogenetic history in the interpretation of linear dune luminescence chronologies: a review of linear dune dynamics. *Progress in Physical Geography* 29: 317-226.
- MYBURGH, J. (1974): An index to relate local topography to mean minimum temperatures. *Agrochomophysica* 6: 73-78.
- NASA-TERRA (2007): EOS and TERRA. <http://terra.nasa.gov/Gallery/>. (12.12.2007).
- NAVEH, Z. (1995): Interactions of landscapes and cultures. *Landscape and urban planning* 32: 43-54.
- NCSA (2007): National Center for Supercomputing Applications. <http://www.ncsa.uiuc.edu/>. (12.12.2007).
- NEEF, E. (1967): Die theoretischen Grundlagen der Landschaftslehre. H. Haack, Gotha. 152 Seiten.
- NEUMANN, K. (1989): Vegetationsgeschichte der Ostsahara im Holozän: Holzkohlen aus prähistorischen Fundstellen. In: KUPER, R. (Hrsgb.): *Forschungen zur Umweltgeschichte der Ostsahara*. Heinrich-Barth-Institut, Köln: 13-182.
- NEW, M., HULME, M. & JONES, P. (1999): Representing Twentieth-Century Space-Time Climate Variability. Part I: Development of a 1961-90 Mean Monthly Terrestrial Climatology. *Journal of climate* 12: 829-856.
- NGA (2007a): National Geospatial-Intelligence Agency. <http://earth-info.nga.mil/gns/html/index.html>. (12.12.2007).
- NGA (2007b): Geonames. <http://gnswww.nga.mil/geonames/GNS/index.jsp>. (12.12.2007).
- NIKOLAKOPOULOS, K., KAMARATAKIS, E. & CHRYSOULAKIS, N. (2006): SRTM vs ASTER elevation products. Comparison for two regions in Crete, Greece. *International Journal of Remote Sensing* 27: 4819-4838.
- NINOMIYA, Y., FU, B. & CUDAHY, T. J. (2005): Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared “radiance-at-sensor”. *Remote Sensing of Environment* 99: 127-139.
- O'CALLAGHAN, F. J. & MARK, D. M. (1984): The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing* 28: 323-344.

- PACHUR, H.-J. & BRAUN, G. (1982): Aspekte paläoklimatischer Befunde in der östlichen Zentralsahara. *Geomethodica* 7: 23-54.
- PACHUR, H.-J & HOELZMANN, P. (2000): Late Quaternary palaeoecology and palaeoclimatites of the eastern Sahara. *Journal of African Earth Sciences* 30: 929-939.
- PACHUR, H.-J. & RÖPER, H. (1984): The Libyan (Western) Desert and Northern Sudan during the Late Pleistocene and Holocene Research in Egypt and Sudan. *Research in Egypt and Sudan* 50: 249-284.
- PARTSCH, J. (1911): Schlesien. 2. Teil - Landeskunde für das deutsche Volk auf wissenschaftlicher Grundlage. Breslau.
- PASSARGE, S. (1912): Physiologische Morphologie. *Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft Hamburg* 26: 135-337.
- PENCK, A. (1894): Morphologie der Erdoberfläche. 2 Bände. J. Engelhorn, Stuttgart. 696 Seiten.
- PEUCKER, C. (1890): Beiträge zur orometrischen Methodenlehre. Dissertation, Breslau.
- PIERI, D. & ABRAMS, M. (2005): ASTER observations of thermal anomalies preceding the April 2003 eruption of Chikurachki volcano, Kurile Islands, Russia. *Remote Sensing of Environment* 99: 84-94.
- PIKE, R. J. (1995): Geomorphometry – progress, practise, and prospect. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Suppl. 101: 221-238.
- QIU, F., ABDELSALAM, M. & THAKKAR, P. (2006): Spectral analysis of ASTER data covering part of the Neoproterozoic Allaqi-Heiani suture, Southern Egypt. *Journal of African Earth Sciences* 44: 169-180.
- RABUS, B., EINEDER, M., ROTH, A. & BAMLER, R. (2003): The shuttle radar topography mission - a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 57: 241-262.
- RASEMANN, S., SCHMIDT, J., SCHROTT, L. & DIKAU, R. (2004): Geomorphometry in mountain terrain. In: BISHOP, M. P. & SCHRODER, J. F. (Hrsgb.): *Geographic Information Science in Mountain Geomorphology*. Springer, Berlin: 101-145.
- RENSCHLER, C. S., DOYLE, M. W. & THOMS, M. (2007): Geomorphology and ecosystems: Challenges and keys for success in bridging disciplines. *Geomorphology* 89: 1-8.

- RICHTHOFEN, F. v. (1877): Die heutigen Aufgaben der wissenschaftlichen Geographie. In: RICHTHOFEN, F. v. (Hrsgb.): *China*, Band 1. Berlin: 729-733.
- RIEMER, H. (2004): Holocene game drives in the Great Sand Sea of Egypt? *Sahara* 15: 31-40.
- RIEMER, H. (in press): Risks and resources in an arid landscape. An archaeological case study from the Great Sand Sea, Egypt. In: BOLLIG, M., BUBENZER, O. & MÖHLIG, W. (Hrsgb.): *Landscape: Theory, methods and cases from interdisciplinary research*. Springer.
- RIEMER, H., KINDERMANN, K. & EICKELKAMP, S. (2004): Dating and production technique of Ounan points in the Eastern Sahara. New archaeological evidence from Abu Tartur, Western Desert of Egypt. *NYAME AKUMA, Bulletin of the Society of Africanist Archaeologists* 61:10-16.
- RIVERA, A., CASASSA, G., BAMBER, J. & KÄÄB, A. (2005): Ice-elevation changes of Glaciar Chico, southern Patagonia, using ASTER DEMs, aerial photography and GPS data. *Journal of Glaciology* 51: 105-112.
- RITTER, M. (2005): Die neue Klimastation des SFB 389 in Balat (Oase Dakhla, Ägypten). Köln (unveröffentlichte Diplomarbeit): 119 Seiten.
- ROWAN, L. C. & MARS, J. C. (2003): Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *Remote Sensing of Environment* 84: 350-366.
- ROWAN, L. C., MARS, J. C. & SIMPSON, C. J. (2005): Lithologic mapping of the Mordor, NT, Australia ultramafic complex by using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *Remote Sensing of Environment* 99: 105-126.
- SAGA (2007): System für Automatisierte Geowissenschaftliche Analysen. <http://www.saga-gis.uni-goettingen.de/html/index.php>.
- SAID, R. (1990): *The Geology of Egypt*. Balkema, Rotterdam. 734 Seiten.
- SAKUMA, F., ONO, A., TSUCHIDA, S., OHGI, N., INADA, H., AKAGI, S. & ONO, H. (2005): On-board Calibration of the ASTER Instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 43: 2715-2724.
- SAVIGEAR, R.A.G. (1960): Slopes and hills in West Africa. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Suppl. 1: 156-171.

- SARNTHEIM, M. (1978): Sand deserts during glacial maximum and climate optimum. *Nature* 272: 43-46.
- SCHANDELMEIER, H., REYNOLDS, P.O. & SEMTNER, A.-K. (Hrsgb.) (1993): North East Africa: Paläogeographisch-paläotektonischer Atlas von NE-Afrika, Arabien und angrenzenden Gebieten. Balkema, Rotterdam.
- SCHMIDT, J., MERZ, B. & DIKAU, R. (1998): Morphological structure and hydrological process modelling. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Suppl. 112: 55-66.
- SCHMIDT, J. & DIKAU, R. (1999): Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models - semantics, methodes, future need. In: DIKAU, R. & SAURER, H. (Hrsgb.): *GIS for Earth Surface Systems*. Gebr. Bornträger, Berlin: 154-173.
- SCHMULLIUS, C., FLÜGEL, W., FROTSCHER, K., HOCHSCHILD, V. & MÜSCHEN, B. (2000): The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) and Applications in Europe, Africa and Siberia. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation* 5: 361-366.
- SCHUMM, S.A. (1956): Evolution of drainage systems and slopes in badlands of Perth Amboy. *Geological Society of America Bulletin* 67: 597-646.
- SCHÜTTENBERG, T. (2004): Interoperabilität von Raumkonzeptionen. Das Phänomen semantischer Heterogenität in geographischen Informationen. Köln (unveröff. Diplomarbeit): 84 Seiten.
- SELBY, R. (2003): Creating DEMs and Orthos from ASTER Satellite Imagery. *GEO:connexion* 2: 48-50.
- SMETTAN, U. (1987): Typische Böden und Bodengesellschaften der Extremwüste Südwest-Ägyptens. *Berliner geowissenschaftliche Abhandlungen. Reihe A* 83. FU Berlin.
- SOHLBACH, K. D. (1978): Computerunterstützte geomorphometrische Analyse von Talformen. E. Goltze, Göttingen. 210 Seiten.
- SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIS, M., AVERYT, K.B., TIGNOR, M. & MILLER, H. L. (2007): Climate Change 2007 contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge. 996 Seiten.
- SONKLAR, C. v. (1873): Allgemeine Orographie die Lehre von den Relief-Formen der Erdoberfläche. W. Braumüller, Wien. 254 Seiten.

- SRIVASTAVA, P., BROOK, G. A. & MARAIS, E. (2005): Depositional environment and luminescence chronology of the Hoarusib River Clay Castles sediments, northern Namib Desert, Namibia. *Catena* 59: 187-204.
- STÄBLEIN, G. (Hrsgb.) (1978): Geomorphologische Detailaufnahme. Beiträge zum GMK-Schwerpunktprogramm I. Im Selbstverlag des Institutes für Physische Geographie der Freien Universität Berlin. 95 Seiten.
- STANGL, M., WERNINGHAUS, R., SCHWEIZER, B., FISCHER, C., BRANDFASS, M., MITTERMAYER, J. & BREIT, H. (2006): TerraSAR-X technologies and first results. *IEE proceedings. Radar, sonar, and navigation* 153: 86-95.
- STEVENS, N. F., MANVILLE, V. & HERON, D. W. (2003): The sensitivity of a volcanic flow model to digital elevation model accuracy: experiments with digitised map contours and interferometric SAR at Ruapehu and Taranaki volcanoes, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 119: 89-105.
- STEVENS, N. F., GARBEIL, H. & MOUGINIS-MARK, P. J. (2004): NASA EOS Terra ASTER: Volcanic topographic mapping and capability. *Remote Sensing of Environment* 90: 405-414.
- STRAHLER, A. (1954): Statistical Analysis in geomorphic research. *Journal of Geology* 62: 1-25.
- SWITZER, A., BRISTOW, C. S. & JONES B. G. (2006): Investigation of large-scale washover of a small barrier system on the southeast Australian coast using ground penetrating radar. *Sedimentary Geology* 183: 145-156.
- TAKASHIMA, T. K., MASUDA, I., SANO, I. & MUKAI, S. (2001): Atmospheric correction for the ASTER visible data on TERRA satellite. *Advances in space research* 28: 177-182.
- TER BRAAK, C. J. F. & SMILAUER, P. (1998): CANOCO reference manual and user's guide to Canoco for Windows: software for canonical community ordination (version 4). Centre for Biometry, Wageningen. 351 Seiten.
- TERRA (2007): TERRA the EOS Flagship. <http://terra.nasa.gov/>. (12.12.2007).
- TITEUX, N., DUFRENE, M., JACOB, J., PAQUAY, M. & DEFOURNY, P. (2004): Multivariate analysis of a fine-scale breeding bird atlas using a geographical information system and partial canonical correspondence analysis: environmental and spatial effects. *Journal of Biogeography* 31: 1841-1856.

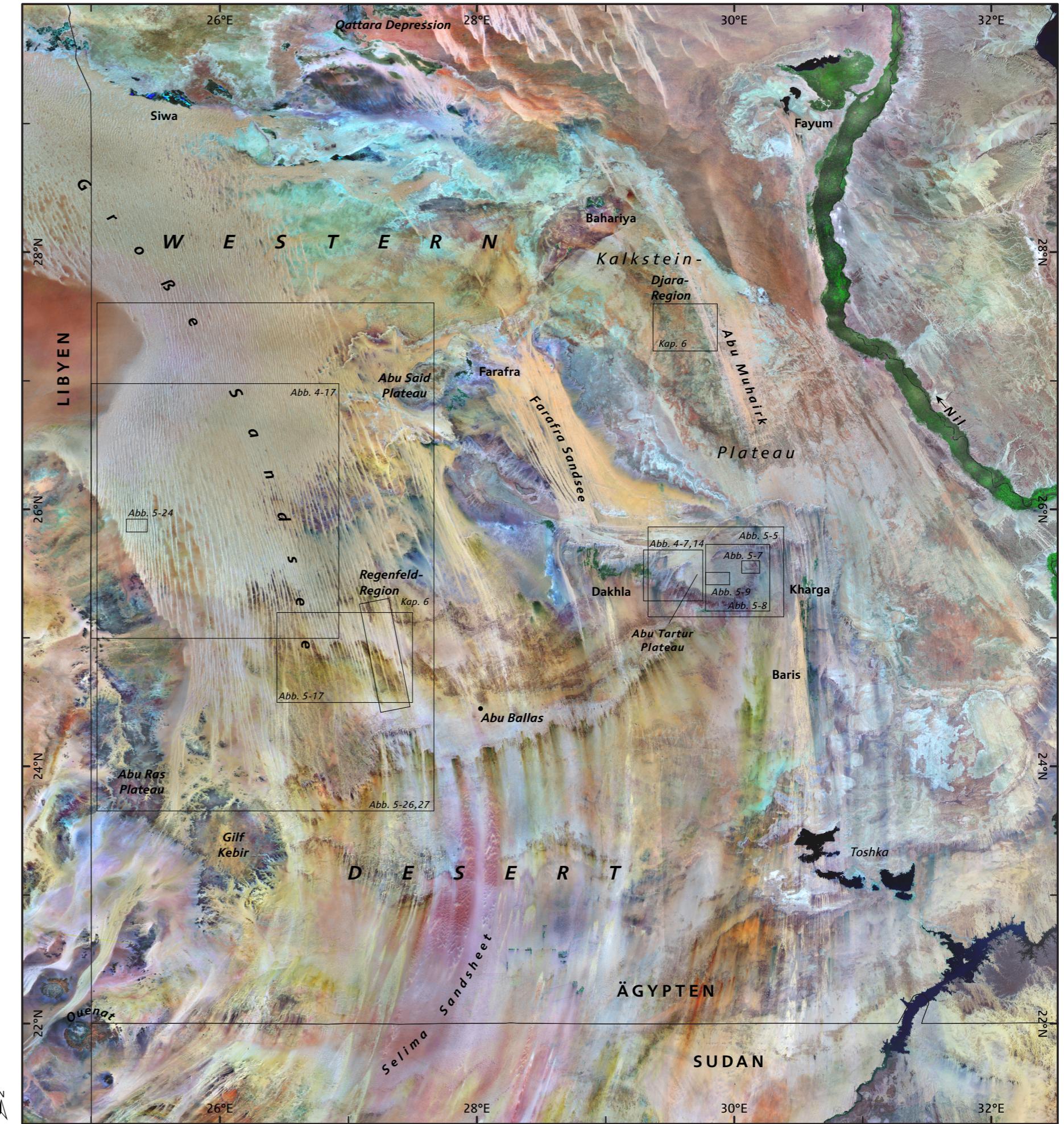
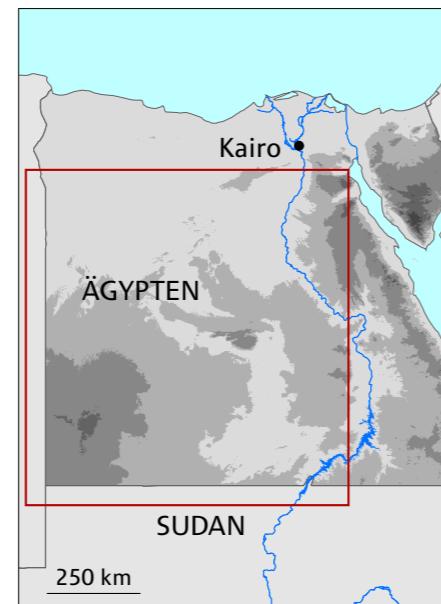
- TOKUNAGA, M. & HARA, S. (1996): DEM Accuracy Derived from ASTER Data. Asian Conference on Remote Sensing (ACRS) Steering Committee. <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1996/ts10/ts10007.asp>. (12.12.2007).
- TOPAZ (2007): TOpographic PArameteriZation. http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=7837&pf=1&cg_id=0.
- TOUTIN, T. & CHENG, P. (2001): DEM generation with ASTER stereo data. *Earth observation magazine* 10: 10-13.
- TOUTIN, T. & CHENG, P. (2002): Comparison of automated digital elevation model extraction results using along-track ASTER and across-track SPOT stereo images. *Optical Engineering* 41: 2102-2106.
- TRESS, G., TRESS, B. & FRY, G. (2005): Clarifying integrative research concepts in landscape ecology. *Landscape Ecology* 20: 479-493.
- TROLL, C. (1939): Luftbildplan und ökologische Bodenforschung. *Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin* 7/8: 241-298.
- TROLL, C. (1966): Landschaftsökologie als geographisch-synoptische Naturbetrachtung. In: TROLL, C. (Hrsg.): *Ökologische Landschaftsforschung und vergleichende Hochgebirgsforschung*. Franz-Steiner-Verlag, Wiesbaden: 1-13.
- TSOAR, H. (2001): Types of Aeolian Sand Dunes and their Formation. In: BALMFORTH, N.J., PROVENZALE, A. (Hrsg.): *Geomorphological Fluids Mechanics*. Lecture Notes in Physics 582: 403-429.
- TURNER, M. G. & GARDNER, R. H. (1991): Quantitative methods in landscape ecology: the analysis and interpretation of landscape heterogeneity. Springer-Verlag, New York. 536 Seiten.
- USGS (1997): United States Geological Survey. *Geological Map of Africa* 1:5,000,000.
- USGS (2007): Earthexplorer. <http://edcns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer/>. (12.12.2007).
- VINKEN, R. (Hrsg.) (1988): Construction and display of geoscientific maps derived from databases. Schweizerbart, Stuttgart. 475 Seiten.
- VIENNEAU, A. (2004): *ArcGIS 9. Using ArcCatalog*. ESRI, Redlands. 243 Seiten.
- Waldhoff, G. (2006): Verbesserung vorhandener geologischer und geomorphologischer Informationen mit Aster-, Hyperion- und Quickbird-Satellitendaten in Ägypten (Dakhla-Oase). Köln (unveröffentlichte Diplomarbeit): 120 Seiten.
- WALKER, W., KELLNDORFER, J. & PIERCE, L. (2007): Quality assessment of SRTM C- and

- X-band interferometric data: Implications for the retrieval of vegetation canopy height. *Remote Sensing of Environment* 106: 428-448.
- WALTER, H. & LIETH, H. (1960): *Klimadiagramm-Weltatlas*. Fischer, Jena.
- WELCH, R., JORDAN, T., LANG, H. & MURAKAMI, H. (1998): ASTER as a Source for Topographic Data in the Late 1990's. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36: 1282-1289.
- WERNER, B. T. (1999): Complexity in Natural Landform Patterns. *Science* 284: 102-107.
- WERNER, M. (2001): Status of the SRTM data processing: when will the world-wide 30m DTM data be available? *GIS* 12: 6-10.
- WIGGS, G.F.S. (2001): Desert dune processes and dynamics. *Progress in Physical Geography* 25: 53-79.
- WIKIPEDIA (2007a): Geoarchäologie. <http://de.wikipedia.org/wiki/Geoarch%C3%A4ologie>. (12.12.2007).
- WIKIPEDIA (2007b): Elektromagnetisches Spektrum. http://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches_Spektrum. (12.12.2007).
- WILSON, I.G. (1973): Ergs. *Sedimentary Geology* 10: 77-106.
- WILSON, J. & GALLANT, J. (2000): *Terrain Analysis: principles and applications*. Wiley, New York. 479 Seiten.
- WMS (2007): Watershed Modelling System. http://www.ems-i.com/WMS/WMS_Overview/wms_overview.html. (12.12.2007).
- WOLKEN, G. J. (2006): High-resolution multispectral techniques for mapping former Little Ice Age terrestrial ice cover in the Canadian High Arctic. *Remote Sensing of Environment* 101: 104-114.
- WORLDVIEW I (2007): DigitalGlobe Pressetext zum Start des Satelliten WorldView I. http://media.digitalglobe.com/index.php?s=press_release_popup&ITEM=139.
- WU, J. & HOBBS, R. J. (2007a): Landscape ecology: the state-of-the-science. In: Wu, J. & HOBBS, R. J. (Hrsg.): *Key topics in landscape ecology*. Cambridge University Press, Cambridge: 271-287.
- WU, J. & HOBBS, R. J. (2007b): *Key topics in landscape ecology*. Cambridge University Press, Cambridge. 314 Seiten.
- YAMAGUCHI, Y., KAHLE, A., TSU, H., KAWAKAMI, T. & PNIEL, M. (1998): Overview of Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *IEEE*

- Transactions on Geoscience and Remote Sensing 36: 1062-1071.
- YAMAGUCHI, Y. & NAITO, C. (2003): Spectral indices for lithologic discrimination and mapping by using the ASTER SWIR bands. International Journal of Remote Sensing 24: 4311-4323.
- ZHANG, X., DRAKE N. A., W. & J. MULLIGAN, M. (1999): Comparsion of Slope Estimates from Low Resolution DEMs: Scaling issues and a Fractal Method for their Solution. Earth Surface Processes and Landforms 24: 763-779.

Anhang I

Zur vereinfachten Handhabung sind in dieser Karte einzelne Abbildungen der vorliegenden Arbeit in der Western Desert Ägyptens verortet.



Anhang II

Der Anhang II umfasst die Rohdaten der Funde Djara und Regenfeld, die als Grundlage zu den Berechnungen in Kapitel 6 dienten. In den Daten sind zunächst die geomorphometrischen Informationen und dann die archäologischen Daten aufgeführt. Die Koordinaten der einzelnen Fundplätze sind gekürzt dargestellt und die UTM-Koordinaten wurden vollständig weggelassen, um ein Auffinden im Gelände ausgehend von dieser Arbeit nicht möglich zu machen.

Die relevanten Parameter sind:

ID	Identifikationsnummer des Fundplatzes in dieser Studie
NORD	Geographische Breite
OST	Geographische Länge
AGE	Alterseinstufung des Fundplatzes
SIZE	Größe des Fundplatzes (Kategorie)
DENSITY	Dichte der Funde (Kategorie)
BLANK_PROD	Rohmaterial
TOOLS	Werkzeug
ARROW	Pfeilspitze
DEC_BEIL	Dechsel
GRIND	Mahlstein
HEARTH	Feuerstelle
OES	Straußeneischale
X_UTM	UTM-Rechtswert
Y_UTM	UTM-Hochwert
ALT_M	Höhe
ASPECT_DEG	Exposition
TOPO_INDEX	TOPO-Index
SLOPE_DEG	Hangneigung
FLOWACC	„Flow-accumulation“
DSTDRN	Länge des Weges zur nächsten Drainagelinie
FLWACC_X	„Flow-accumulation“ an DSTDRN
FLC_210	HYDRO-Index
INDEX_210X	UTM-Rechtswert HYDRO-Index
INDEX_210Y	UTM-Hochwert HYDRO-Index

Djara

ID	RECNR	PROJEKT	GARMIN	WPT	NORD	OST	KFZ	KM	CODE	Age	Size
1	-999	SFB	No	-999	27.4	29.6	No	-999	No Code	Middle Holocene	Small
2	-999	SFB	No	-999	27.4	29.6	No	-999	No Code	Early Holocene	Middle
3	-999	SFB	No	-999	27.4	29.7	No	-999	No Code	Middle Holocene	Small
4	1149	SFB	F	148	27.4	29.7	A3	-999	Fp	Middle Holocene	Middle
5	1632	SFB	D	862	27.4	29.7	Ä2	-999	Fp	Middle Holocene	Middle
6	971	SFB	E	37	27.4	29.6	Ä3	81114	Sb, Veg	Middle Holocene	Small
7	1203	SFB	F	202	27.4	29.7	Ä3	-999	Fp	Middle Holocene	Small
8	1046	SFB	F	45	27.4	29.7	Ä3	-999	Fp	Middle Holocene	Large
9	980	SFB	E	46	27.4	29.7	Ä3	81169	Sb, Veg	Early Holocene	Middle
10	980	SFB	E	46	27.4	29.7	Ä3	81169	Sb, Veg	Middle Holocene	Middle
11	-999	SFB	No	-999	27.4	29.6	No	-999	No Code	Middle Holocene	Small
12	1579	SFB	D	809	27.4	29.7	A2	-999	Fp	Middle Holocene	Middle
13	1661	SFB	D	891	27.4	29.7	A2	-999	Fp	Middle Holocene	Middle
14	-999	SFB	No	-999	27.4	29.7	No	-999	No Code	Middle Holocene	Small
15	2650	SFB	W	247	27.4	29.7	Oa	-999	Oa	Middle Holocene	Small
16	1538	SFB	D	768	27.4	29.7	Ä2	-999	Fp	Middle Holocene	Middle
17	-999	SFB	A	2046	27.4	29.8	No	-999	No Code	Middle Holocene	Small
18	2124	SFB	C	726	27.4	29.6	A2	67591	Fp	Early Holocene	Small
19	2124	SFB	C	726	27.4	29.6	Ä2	67591	Fp	Middle Holocene	Large
20	-999	SFB	No	-999	27.4	29.6	No	-999	No Code	Middle Holocene	Small
21	-999	SFB	No	-999	27.4	29.6	No	-999	No Code	Middle Holocene	Small
22	2406	SFB	W	3	27.4	29.7	Oa	-999	Oa	Middle Holocene	Middle
23	-999	SFB	No	-999	27.4	29.5	No	-999	No Code	Middle Holocene	Middle
24	8381	SFB	A	1238	27.5	29.8	Ä1	63691	Sb	Middle Holocene	Middle
25	8538	SFB	D	169	27.5	29.8	Ä2	-999	Fp	Middle Holocene	Middle
26	-999	SFB	No	-999	27.4	29.7	No	-999	No Code	Middle Holocene	Small
27	-999	SFB	No	-999	27.4	29.7	No	-999	No Code	Middle Holocene	Middle
28	-999	SFB	No	-999	27.4	29.7	No	-999	No Code	Middle Holocene	Middle
29	-999	SFB	No	-999	27.5	29.7	No	-999	No Code	Middle Holocene	Middle
30	-999	SFB	No	-999	27.5	29.7	No	-999	No Code	Uncertain	Middle
31	-999	SFB	No	-999	27.4	29.6	No	-999	No Code	Uncertain	Middle
32	-999	SFB	No	-999	27.4	29.6	No	-999	No Code	Middle Holocene	Middle
33	-999	SFB	No	-999	27.4	29.5	No	-999	No Code	Middle Holocene	Middle
34	-999	SFB	No	-999	27.5	29.7	No	-999	No Code	Middle Holocene	Middle
35	-999	SFB	No	-999	27.4	29.6	No	-990	No Code	Middle Holocene	Middle
36	972	SFB	E	38	27.4	29.6	A3	81114	Sb, Veg	Middle Holocene	Small
37	-999	SFB	No	-999	27.4	29.8	No	-999	No Code	Middle Holocene	Small
38	-999	SFB	No	-999	27.4	29.7	No	-999	No Code	Middle Holocene	Middle
39	-999	SFB	No	-999	27.4	29.7	No	-999	No Code	Middle Holocene	Middle
40	-999	SFB	No	-999	27.4	29.7	No	-999	No Code	Middle Holocene	Small
41	-999	SFB	No	-999	27.4	29.7	No	-999	No Code	Middle Holocene	Small
42	965	SFB	E	31	27.4	29.6	A3	81098	Sb, Veg	Middle Holocene	Small
43	976	SFB	E	42	27.5	29.7	A3	81161	Sb, Veg	Middle Holocene	Large
44	978	SFB	E	44	27.4	29.7	A3	81163	Sb, Veg	Middle Holocene	Large
45	1804	SFB	E	62	27.4	29.7	A3	89299	Sb, Veg	Middle Holocene	Small
46	1815	SFB	E	73	27.4	29.7	A3	89303	Sb	Middle Holocene	Middle
47	1818	SFB	E	76	27.4	29.7	Ä3	89828	Sb	Middle Holocene	Middle
48	1521	SFB	D	751	27.4	29.7	Ä2	-999	Sb	Middle Holocene	Middle
49	1522	SFB	D	752	27.4	29.7	Ä2	-999	Sb	Middle Holocene	Small
50	1507	SFB	D	737	27.4	29.7	A2	-999	Sb	Middle Holocene	Small
51	1816	SFB	E	74	27.4	29.7	Ä3	89303	Sb	Early Holocene	Small
52	1972	SFB	A	2072	27.3	29.7	Ä1	101431	Sb, Veg	Middle Holocene	Small
53	1974	SFB	A	2074	27.3	29.7	Ä1	101432	Sb, Veg	Middle Holocene	Middle
54	5754	SFB	B	45	27.4	29.7	Ä1	917	Sb, Veg	Middle Holocene	Middle
55	-999	SFB	No	0	27.4	29.7	No	-999	No Code	Middle Holocene	Middle
56	6029	SFB	F	18	27.4	29.7	A3	901	Fb	Middle Holocene	Small
57	6040	SFB	F	29	27.4	29.7	A3	924	Fb, Geo	Early Holocene	Small
58	6046	SFB	F	34	27.4	29.7	A3	931	Fb	Early Holocene	Middle
59	5862	SFB	B	235	27.3	29.7	Ä1	6028	Sb	Middle Holocene	Small
60	6186	SFB	F	174	27.4	29.6	Ä3	6584	Sb, Veg	Early Holocene	Small
61	6175	SFB	F	163	27.4	29.7	A3	6563	Sb	Middle Holocene	Middle
62	5874	SFB	B	247	27.4	29.7	Ä1	6061	Sb, Veg	Middle Holocene	Middle
63	5875	SFB	B	248	27.4	29.7	Ä1	6063	Sb, Veg	Middle Holocene	Middle
64	-999	SFB	No	-999	27.5	29.6	No	-999	No Code	Middle Holocene	Middle
65	-999	SFB	No	-999	27.4	29.6	No	-999	No Code	Middle Holocene	Small
66	7607	SFB	D	8	27.4	29.6	Ä2	37756	Sb, Veg	Middle Holocene	Middle
67	-999	SFB	No	-999	27.4	29.6	No	-999	No Code	Uncertain	Middle
68	-999	SFB	No	-999	27.4	29.6	No	-999	No Code	Uncertain	Middle
69	8451	SFB	A	1309	27.5	29.7	Ä1	67819	Sb, Veg	Uncertain	Small
70	-999	SFB	No	-999	27.4	29.6	No	-999	No Code	Middle Holocene	Middle
71	-999	SFB	No	-999	27.4	29.6	No	-999	No Code	Middle Holocene	Middle
72	-999	SFB	No	-999	27.4	29.6	No	-999	No Code	Middle Holocene	Middle
73	-999	SFB	No	-999	27.4	29.6	No	-999	No Code	Middle Holocene	Middle
74	6188	SFB	F	176	27.4	29.6	A3	6585	Fb	Middle Holocene	Middle
75	10003	HBI	Oa	5	27.5	29.5	Oa	999	Fb, Wz	Uncertain	Small
76	5868	SFB	B	241	27.4	29.6	Ä1	6051	Fb	Middle Holocene	Small
77	5755	SFB	B	46	27.4	29.7	Ä1	921	Fb	Uncertain	Small
78	6190	SFB	F	178	27.4	29.7	A3	6588	Fb, Geo	Uncertain	Small
79	6243	SFB	F	13	27.4	29.7	A3	8431	Fb	Uncertain	Small
80	6358	SFB	D	69	27.4	29.6	Ä2	5783	Fb	Uncertain	Small
81	5860	SFB	B	233	27.2	29.7	Ä1	6021	Fb, Fot	Middle Holocene	small

Djara

ID	Density	blank_prod	tools	Arrow	Dec_Beil	Grind	Hearth	OES	Fundpl	Survey
1	isolated		1	1	0	0	0	1	0	Å00/55 Å00/HR27
2	isolated		1	1	0	0	0	0	0	Å00/56 Å00/HR26
3	isolated		0	1	0	0	1	1	0	Å00/63 No Name
4	dense		1	1	1	1	1	1	1	Å00/64 Å00/HR40a
5	dense		1	1	1	1	1	1	1	Å00/65 Å00/HR41
6	isolated		1	1	0	0	0	1	0	Å00/66 Å00/KH02
7	dense		1	1	1	1	1	1	1	Å00/67 No Name
8	dense		1	1	1	1	1	1	1	Å00/68 Å00/HR40b
9	light		1	0	0	0	0	1	0	Å00/69 Å00/KK05
10	light		1	1	1	1	0	1	0	Å00/69 Å00/KK05
11	light		1	1	0	0	1	1	0	Å00/90 Å00/HR34
12	dense		1	1	1	1	1	1	1	Å00/91 No Name
13	dense		1	1	1	1	1	1	1	Å00/92 No Name
14	light	0	1	0	0	0	1	1	0	Å00/94 No Name
15	dense	1	1	1	1	1	1	1	1	Å00/95 No Name
16	dense	1	1	1	1	1	1	1	1	Å00/96 No Name
17	isolated	0	1	0	0	0	0	1	0	Å02/01 Å02/HR01
18	dense	1	1	0	0	0	0	1	0	Å90/01 No Name
19	dense	1	1	1	1	1	1	1	1	Å90/01 No Name
20	isolated	1	0	0	0	0	0	0	0	Å93/01 No Name
21	dense	1	1	0	0	0	0	0	0	Å98/03 No Name
22	dense	1	1	1	1	1	1	1	1	Å98/04 Å96/KK05
23	light	1	1	0	0	0	0	0	0	Å99/07 Å99/HR18
24	light	1	1	0	0	0	1	1	0	Å99/11 Å99/KK09
25	dense	1	1	0	0	0	0	1	0	Å99/18 Å99/HR13
26	isolated	1	0	0	1	0	1	1	0	Å99/21 Å99/HR21
27	light	1	1	0	1	1	1	1	0	Å99/22 Å99/HR22
28	isolated	0	1	0	0	0	0	1	0	Å99/23 Å99/HR23
29	light	1	1	0	1	1	1	1	0	Å99/24 Å99/HR24
30	isolated	1	1	0	0	1	0	0	0	Å99/25 Å99/HR25
31	light	1	1	0	0	0	0	0	0	Å99/26 Å99/HR20
32	dense	1	1	0	0	0	1	1	0	Å99/27 Å99/HR16
33	light	1	1	0	0	0	1	1	0	Å99/29 Å99/HR17
34	light	1	1	0	0	0	1	1	0	Å99/40 Å99/HR26
35	light	1	1	0	0	0	0	1	0	Å99/50 Å99/HR19
36	isolated	0	1	0	0	0	1	1	0	No Name A00/EC03
37	light	1	1	0	1	1	1	1	0	No Name Å00/HR35
38	isolated	1	1	0	1	1	1	1	0	No Name Å00/HR36
39	isolated	1	1	0	0	0	1	1	0	No Name Å00/HR37
40	isolated	0	1	0	0	0	0	0	0	No Name Å00/HR38
41	light	1	1	1	1	1	1	1	0	No Name Å00/HR39a
42	light	1	0	0	0	0	0	0	0	No Name Å00/KH01
43	light	1	1	0	0	0	1	1	0	No Name Å00/KK03
44	light	1	1	0	0	0	1	1	0	No Name Å00/KK04
45	light	1	1	1	1	1	1	1	0	No Name Å01/HR01
46	light	1	1	0	1	1	1	1	0	No Name Å01/HR02
47	light	0	1	0	0	0	1	1	0	No Name Å01/HR03
48	light	1	1	0	0	0	0	1	0	No Name Å01/HR05
49	isolated	1	1	0	0	0	0	1	0	No Name Å01/HR06
50	light	1	1	0	0	0	0	1	0	No Name Å01/HR07
51	light	1	1	0	0	0	0	0	0	No Name Å01/KK01
52	dense	1	1	0	0	0	0	1	0	No Name Å02/HR02
53	dense	1	1	0	1	1	1	1	0	No Name Å02/HR03
54	light	1	1	1	1	0	1	0	0	No Name Å95/BG01
55	light	1	1	0	1	0	0	1	0	No Name Å95/KK01
56	light	1	1	0	0	1	1	1	0	No Name Å95/KK02
57	light	1	1	0	0	0	0	1	0	No Name Å95/KK03
58	light	1	0	0	0	0	0	1	0	No Name Å95/KK04
59	dense	1	0	0	0	0	0	0	0	No Name Å96/BG18
60	dense	1	0	0	0	0	0	0	0	No Name Å96/BG19
61	dense	1	1	0	0	0	1	1	0	No Name Å96/KK04
62	dense	1	1	1	1	1	1	1	0	No Name Å96/SP03
63	dense	1	1	0	1	1	1	1	0	No Name Å96/SP04
64	light	1	1	0	0	0	0	1	0	No Name Å98/HR04
65	dense	1	1	0	0	0	0	1	0	No Name Å98/JL03
66	dense	1	1	0	0	0	1	1	0	No Name Å98/KK01
67	isolated	1	0	0	0	0	0	1	0	No Name Å99/HR01
68	isolated	1	0	0	0	0	1	0	0	No Name Å99/HR02
69	isolated	0	0	0	0	0	0	1	0	No Name Å99/HR03
70	light	1	0	0	0	0	1	0	0	No Name Å99/KK12
71	isolated	0	1	0	0	0	0	1	0	No Name Å99/KK13
72	light	1	0	0	0	0	0	0	0	No Name Å99/KK14
73	light	1	1	0	0	0	0	0	0	No Name Å99/KK15
74	light	1	1	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
75	isolated	0	0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
76	isolated	0	1	0	0	0	0	0	0	No Name no Name
77	isolated	0	0	0	0	0	1	0	0	No Name no Name
78	isolated	0	0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
79	isolated	0	1	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
80	isolated	0	0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
81	isolated		1	1	0	0	0	0	0	No Name no Name

Djara

ID	Beschreibung	x_UTM	y_UTM	Alt_m
1				174.8567
2				181.3906
3				173.5490
4	Cluster2			165.1271
5				171.9173
6	Kleine Senke mit Vegetation und mehreren Steinplätzen			186.3701
7	Rand der Fundkonzentration			172.7104
8				173.5818
9	Kleine Senke mit Büschen und 4 Schlagplätzen			173.8507
10	Kleine Senke mit Büschen und 4 Schlagplätzen			173.8507
11				184.3438
12				171.3854
13				169.7613
14				171.3466
15	Fragment eines bifaziell retuschierten Messers			173.1406
16				169.6607
17				156.2673
18				186.5897
19				186.5897
20				187.5679
21				183.5103
22	Meßpunkt 0/20			171.0316
23				207.3268
24				173.4844
25				170.4890
26				176.9183
27				177.5277
28				173.5440
29				169.4255
30				168.5804
31				190.3333
32				188.4737
33				207.5949
34				169.5811
35				192.3452
36	Senke mit Büschen (etwa 30)			187.1028
37				157.1930
38				178.9844
39				174.6234
40				175.4223
41				169.4962
42	Kleine Senke mit Vegetation (mehr als 50) und kleine Schlagsituation, hellbrauner Flint			186.5906
43	Kleine Senke mit Büschen in Serirlandschaft			169.7472
44	Senke mit etwa 60 Büschen und 2 Tamarisken			167.5472
45	Senke mit ca. 20 Büschen, wenigen Steinplätzen			190.2002
46				187.0210
47	Ca. 50 x 20 m großer Fundplatz mit Steinplätzen, großen Steinen und mittelholozänen Geräten			174.3139
48				172.2306
49				167.4876
50				172.1368
51				183.5140
52	1 Hillock (Haloxylon)			188.6474
53	Mehrere Steinplätze mit gröberen Abschlägen und Klingen, 1 flächenretuschiertes Artefakt, Reibstein; Hillock (Francoeria, Haloxylon), tot (h=233m)			189.3789
54	Artefakte in Vegetation (flächenretuschierte Artefakte)			161.5435
55				189.7848
56	Mehrere Steinplätze			188.9670
57	Fundplatz in Senke			174.2419
58	Etwa 20 gut erhaltene Steinplätze			179.4307
59				205.0330
60	Gekrümmtes Wadi, Dornenbüsche, Klingen, Levalloiskerne und -abschläge (z.T. retuschiert und stark verrundet), Lamellen und Lamellenkerne			177.4295
61				174.0031
62	Flächenretuschiertes Material, Abschläge, Kernsteine, verschiedene kleine, zusammenhängende Senken, Serir, Vegetation, Kalksteinoutcrops			170.6925
63	Weite Senke mit Vegetation, Serir, Kalksteinoutcrops			170.0056
64				178.1886
65				176.4869
66	Fundplatz in Peripherie von Tamarisken-Senke = A98/KK1			172.7318
67				175.8454
68				177.6047
69	Vegetationssenke mit Steinplätzen			168.5559
70				186.0610
71				185.2546
72				188.1984
73				186.9149
74	Ahnliche kleine Senke (wie WPT 175) mit Schlagplätzen, Steinplätzen, Klingen, Schaber, Kerne,			176.3347
75	Alam und Steinplätze			212.0806
76	Artefakte aus Feuerstein: 1 Levalloisspitzenkern, 1 Levalloisabschlag, 2 Schaber, 1 flächig retuschiertes Stück, 2 Kerne (locker verteilt über eine Fläche von ca. 20m); verschiedene kleine, zusammenhängende Senken mit Vegetation zwischen Kalksteinhü			179.8084
77	Diverse Steinplätze			170.5440
78	Drei Steinplätze in Ebene			176.6549
79	Drei Steinplätze mit Steinartefakten (lockere Fundstreu), in kleiner Senke mit Serir gelegen (Fotos			172.9260
80	Drei Steinplätze, davon einer mit Holzkohle			175.8428
81	Ein flächenretuschiertes Stück und eine Klinge mit dickem Schlagflächenrest in Senke mit Vegetation (abseits der Piste), Foto			188.3675

Djara

ID	Aspect_Deg	Topo_Index	Slope_Deg	flowacc	Geologie	Geol_cd	dstdrn	flwacc_x
1	238.4135	0.7704	2.2768	15735.0000	Tetn	3.0000	0.0000	15735.0000
2	238.8621	1.4707	1.6830	1.0000	Tetn	3.0000	108.1665	335075.0000
3	327.9095	0.3522	1.3016	2.0000	Tetn	3.0000	161.5549	5320.0000
4	314.4611	0.5123	5.0492	0.0000	Tetn	3.0000	30.0000	1413.0000
5	346.0625	0.1361	0.3743	17.0000	Tetn	3.0000	84.8528	947.0000
6	156.7154	0.1060	0.7192	0.0000	Tetn	3.0000	216.3331	260.0000
7	197.5575	3.1781	3.9944	3796.0000	Tetn	3.0000	0.0000	3792.0000
8	83.4081	1.9590	1.1284	0.0000	Tetn	3.0000	84.8528	780.0000
9	234.3516	1.3601	1.0854	0.0000	Tetn	3.0000	108.1665	2823.0000
10	234.3516	1.3601	1.0854	0.0000	Tetn	3.0000	108.1665	2823.0000
11	104.8128	0.4618	0.6892	6.0000	Tetn	3.0000	120.0000	50402.0000
12	329.6201	2.4373	2.3764	0.0000	Tetn	3.0000	150.0000	398706.0000
13	261.1213	0.0237	1.3947	6.0000	Tetn	3.0000	84.8528	398706.0000
14	172.2381	0.1221	0.3598	927.0000	Tetn	3.0000	0.0000	398706.0000
15	272.2631	3.3046	0.5467	0.0000	Tetn	3.0000	0.0000	1110.0000
16	26.2492	2.6822	0.8974	28.0000	Tetn	3.0000	30.0000	3695.0000
17	277.1249	0.9584	2.0395	58.0000	Tei	2.0000	60.0000	350.0000
18	279.8849	0.9010	0.3758	1.0000	Tetn	3.0000	152.9706	5447.0000
19	279.8849	0.9010	0.3758	1.0000	Tetn	3.0000	152.9706	5447.0000
20	53.9290	1.6687	0.6501	0.0000	Tetn	3.0000	180.0000	5447.0000
21	129.6470	0.0877	1.0324	437.0000	Tetn	3.0000	0.0000	437.0000
22	120.8961	2.9367	1.8479	17.0000	Tetn	3.0000	84.8528	1283.0000
23	170.6925	1.1751	1.2476	2.0000	Tetn	3.0000	30.0000	25411.0000
24	135.8512	0.6370	0.6221	49.0000	Tei	2.0000	241.8677	202.0000
25	59.4257	0.1075	0.4781	226.0000	Tei	2.0000	0.0000	226.0000
26	356.9739	2.0679	0.8398	3.0000	Tetn	3.0000	335.4102	203.0000
27	249.3413	2.0200	3.9141	0.0000	Tetn	3.0000	127.2792	4833.0000
28	36.5434	2.2147	1.8385	1.0000	Tei	2.0000	271.6616	619.0000
29	95.8980	1.0190	1.1365	78.0000	Tei	2.0000	30.0000	13161.0000
30	27.5671	2.6049	1.2242	8.0000	Tei	2.0000	60.0000	3079.0000
31	274.1590	1.4404	2.3397	8.0000	Tetn	3.0000	84.8528	2322.0000
32	313.8896	0.0017	2.4625	85.0000	Tetn	3.0000	192.0937	264.0000
33	290.4628	0.6040	2.0128	5.0000	Tetn	3.0000	84.8528	490.0000
34	221.2884	2.4969	0.9375	32.0000	Tei	2.0000	67.0820	254433.0000
35	342.4160	0.2159	0.9895	0.0000	Tetn	3.0000	84.8528	3975.0000
36	310.8779	0.1228	0.6752	84.0000	Tetn	3.0000	134.1641	299.0000
37	68.5680	2.2551	0.6752	10.0000	Tei	2.0000	60.0000	42661.0000
38	57.3361	2.2236	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	108.1665	2446.0000
39	207.8224	0.6601	0.6752	24.0000	Tetn	3.0000	30.0000	2414.0000
40	239.3412	1.8864	0.6752	4.0000	Tetn	3.0000	30.0000	1465.0000
41	233.7401	0.0000	0.6752	4.0000	Tetn	3.0000	150.0000	3134.0000
42	314.0797	1.7480	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	150.0000	243.0000
43	278.0124	1.4412	0.6752	0.0000	Tei	2.0000	84.8528	13192.0000
44	278.3379	1.7367	0.6752	57784.0000	Tei	2.0000	0.0000	57781.0000
45	133.1209	1.9464	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	84.8528	297.0000
46	38.6202	3.5676	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	67.0820	232.0000
47	169.1647	3.2646	0.6752	3.0000	Tetn	3.0000	84.8528	398430.0000
48	234.8024	2.2498	0.6752	100.0000	Tetn	3.0000	42.4264	3134.0000
49	285.2324	1.5332	0.6752	1.0000	Tetn	3.0000	60.0000	3695.0000
50	295.7707	0.9221	0.6752	6.0000	Tetn	3.0000	169.7056	3695.0000
51	152.3002	0.4235	0.6752	224.0000	Tetn	3.0000	0.0000	224.0000
52	331.8225	0.0092	0.6752	66.0000	Tetn	3.0000	150.0000	276.0000
53	325.7258	0.1490	0.6752	12.0000	Tetn	3.0000	150.0000	588.0000
54	310.1038	0.5398	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	212.1320	335.0000
55	24.4424	0.1470	0.6752	1.0000	Tetn	3.0000	30.0000	2291.0000
56	301.5361	0.0007	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	42.4264	244.0000
57	25.3614	2.4200	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	108.1665	2823.0000
58	141.3374	1.0726	0.6752	2.0000	Tetn	3.0000	174.9286	932.0000
59	207.7824	1.8531	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	469.5743	386.0000
60	6.7805	0.9306	0.6752	13.0000	Tetn	3.0000	296.9849	399.0000
61	260.7851	0.0964	0.6752	10.0000	Tetn	3.0000	30.0000	1658.0000
62	258.9134	0.2861	0.6752	5.0000	Tetn	3.0000	30.0000	4491.0000
63	335.0762	1.1423	0.6752	3.0000	Tetn	3.0000	30.0000	6267.0000
64	86.7095	2.1435	0.6752	3.0000	Tei	2.0000	84.8528	244.0000
65	191.1271	0.1615	0.6752	9.0000	Tetn	3.0000	150.0000	334214.0000
66	255.7134	0.0101	0.6752	6.0000	Tetn	3.0000	30.0000	520.0000
67	7.5316	0.5405	0.6752	66.0000	Tetn	3.0000	150.0000	203.0000
68	117.4609	2.6061	0.6752	1.0000	Tetn	3.0000	120.0000	520.0000
69	151.7252	0.6102	0.6752	17.0000	Tei	2.0000	67.0820	13134.0000
70	349.9188	2.0028	0.6752	1283.0000	Tetn	3.0000	0.0000	1283.0000
71	132.4868	1.1830	0.6752	3.0000	Tetn	3.0000	30.0000	43975.0000
72	207.2214	1.5782	0.6752	2.0000	Tetn	3.0000	108.1665	218.0000
73	337.1613	0.1910	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	67.0820	5447.0000
74	6.0150	0.7246	0.6752	3.0000	Tetn	3.0000	0.0000	214.0000
75	214.0303	0.5856	0.6752	4.0000	Tetn	3.0000	42.4264	568.0000
76	18.1982	0.2876	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	189.7367	1237.0000
77	163.0382	0.7235	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	0.0000	4486.0000
78	211.9029	0.8495	0.6752	9.0000	Tetn	3.0000	268.3282	218.0000
79	176.5623	0.0238	0.6752	405317.0000	Tetn	3.0000	0.0000	405317.0000
80	141.0750	0.0369	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	256.3201	203.0000
81	304.7374	0.1707	0.6752	46.0000	Tetn	3.0000	241.8677	3238.0000

Djara

ID	fic_210	index_210X	index_210Y
1	317180.0000		
2	335276.0000		
3	12.0000		
4	398830.0000		
5	128.0000		
6	193.0000		
7	405294.0000		
8	87.0000		
9	18.0000		
10	18.0000		
11	50403.0000		
12	17.0000		
13	398733.0000		
14	398713.0000		
15	398829.0000		
16	3188.0000		
17	418.0000		
18	29.0000		
19	29.0000		
20	17.0000		
21	475.0000		
22	17.0000		
23	42.0000		
24	162.0000		
25	226.0000		
26	133.0000		
27	6.0000		
28	47.0000		
29	254676.0000		
30	3089.0000		
31	2322.0000		
32	151.0000		
33	490.0000		
34	254469.0000		
35	3963.0000		
36	306.0000		
37	42665.0000		
38	2657.0000		
39	2446.0000		
40	1472.0000		
41	91.0000		
42	22.0000		
43	184.0000		
44	57916.0000		
45	68.0000		
46	240.0000		
47	398475.0000		
48	3184.0000		
49	3188.0000		
50	3188.0000		
51	240.0000		
52	138.0000		
53	562.0000		
54	64.0000		
55	2273.0000		
56	297.0000		
57	30.0000		
58	48.0000		
59	13.0000		
60	116.0000		
61	1658.0000		
62	4495.0000		
63	406589.0000		
64	206694.0000		
65	113.0000		
66	55205.0000		
67	203.0000		
68	335472.0000		
69	13142.0000		
70	42160.0000		
71	44019.0000		
72	7.0000		
73	5454.0000		
74	335075.0000		
75	582.0000		
76	14.0000		
77	4495.0000		
78	49.0000		
79	405435.0000		
80	55.0000		
81	88.0000		

Djara

ID	RECNR	PROJEKT	GARMIN	WPT	NORD	OST	KFZ	KM	CODE	Age	Size
82	532	SFB	D	330	27.4	29.7	Ä2	59283	Fb	Uncertain	Small
83	6366	SFB	D	77	27.3	29.7	Ä2	5843	Fb	Uncertain	Small
84	5762	SFB	B	53	27.4	29.6	Ä1	954	Fb	Uncertain	Small
85	5876	SFB	B	249	27.4	29.7	Ä1	6067	Fb, Geo	Middle Holocene	Small
86	5870	SFB	B	243	27.4	29.6	Ä1	6054	Fb, Veg	Uncertain	Small
87	6022	SFB	F	11	27.4	29.7	Ä3	891	Fb, Veg	Uncertain	Small
88	6018	SFB	F	7	27.4	29.7	Ä3	866	Fb	Uncertain	Small
89	1975	SFB	A	2075	27.3	29.7	Ä1	101434	Fb	Uncertain	Small
90	6401	SFB	D	112	27.4	29.8	Ä2	7645	Fb, Geo	Uncertain	Small
91	6056	SFB	F	44	27.4	29.6	Ä3	944	Fb, Veg	Uncertain	Small
92	5871	SFB	B	244	27.4	29.7	Ä1	6056	Fb	Uncertain	Small
93	1353	SFB	A	1934	27.5	29.6	Ä1	93507	Veg, Fb	Uncertain	Small
94	5757	SFB	B	48	27.4	29.7	Ä1	927	Fb	Uncertain	Small
95	6028	SFB	F	17	27.4	29.7	Ä3	901	Fb, Geo	Uncertain	Small
96	6173	SFB	F	161	27.4	29.7	Ä3	6560	Fb	Uncertain	Small
97	6178	SFB	F	166	27.5	29.6	Ä3	6569	Fb, Geo	Uncertain	Small
98	6403	SFB	D	114	27.4	29.7	Ä2	7653	Fb	Middle Holocene	Small
99	531	SFB	D	329	27.4	29.7	Ä2	59281	Fb, Veg	Uncertain	Small
100	528	SFB	D	326	27.4	29.7	Ä2	59278	Fb, Veg	Uncertain	Small
101	530	SFB	D	328	27.4	29.7	Ä2	59280	Fb, Veg	Uncertain	Small
102	427	SFB	A	1757	27.4	29.8	Ä1	84403	Veg, Fb	Middle Holocene	Small
103	525	SFB	D	323	27.4	29.7	Ä2	59275	Fb, Veg	Middle Holocene	Small
104	6174	SFB	F	162	27.4	29.6	Ä3	6562	Fb, Veg	Middle Holocene	Small
105	7557	SFB	B	22	27.4	29.7	Ä1	43034	Fb	Uncertain	Small
106	6182	SFB	F	170	27.4	29.6	Ä3	6578	Fb, Veg	Uncertain	Small
107	6197	SFB	F	185	27.3	29.7	Ä3	6641	Fb, Veg	Uncertain	Small
108	6176	SFB	F	164	27.4	29.7	Ä3	6565	Fb, Veg	Uncertain	Small
109	2132	SFB	C	734	27.3	29.6	Ä2	67625	Fb, Veg	Uncertain	Small
110	6165	SFB	F	153	27.2	29.7	Ä3	6528	Fb, Veg	Middle Holocene	Small
111	977	SFB	E	43	27.4	29.7	Ä3	81162	Fb, Veg	Uncertain	Small
112	2131	SFB	C	733	27.3	29.7	Ä2	67614	Fb	Uncertain	Small
113	979	SFB	E	45	27.4	29.7	Ä3	81166	Fb, Veg	Uncertain	Small
114	6031	SFB	F	20	27.4	29.6	Ä3	902	Fb, Geo	Uncertain	Small
115	2126	SFB	C	728	27.3	29.7	Ä2	67609	Lag	Uncertain	Small
116	6170	SFB	F	158	27.4	29.6	Ä3	6551	Fb, Geo	Uncertain	Small
117	6196	SFB	F	184	27.3	29.7	Ä3	6638	Fb	Uncertain	Small
118	6038	SFB	F	27	27.4	29.6	Ä3	921	Fb	Uncertain	Small
119	6183	SFB	F	171	27.4	29.6	Ä3	6579	Fb, Veg	Middle Holocene	Small
120	6043	SFB	F	31	27.4	29.7	Ä3	926	Fb, Geo	Uncertain	Small
121	5881	SFB	B	254	27.4	29.8	Ä1	6072	Fb, Veg	Middle Holocene	Small
122	5884	SFB	B	257	27.4	29.7	Ä1	6078	Fb, Veg	Uncertain	Small
123	1973	SFB	A	2073	27.3	29.7	Ä1	101431	Fb	Early Holocene	Small
124	6181	SFB	F	169	27.4	29.6	Ä3	6574	Fb, Veg	Uncertain	Small
125	6177	SFB	F	165	27.5	29.7	Ä3	6566	Fb, Geo	Uncertain	Small
126	1440	SFB	D	639	27.4	29.6	Ä2	-999	Fp	Early Holocene	Middle
127	1440	SFB	D	639	27.4	29.6	Ä2	-999	Fp	Middle Holocene	Large
128	9744	HBI	Oa	27	27.5	29.6	Oa	-999	Fb	Uncertain	Small
129	8539	SFB	D	170	27.5	29.8	Ä2	50447	Fb	Uncertain	Small
130	6405	SFB	D	116	27.3	29.7	Ä2	7669	Fb	Uncertain	Small
131	6026	SFB	F	15	27.4	29.7	Ä3	900	Fb	Uncertain	Small
132	6049	SFB	F	37	27.4	29.6	Ä3	934	Fb	Uncertain	Small
133	6051	SFB	F	39	27.4	29.6	Ä3	934	Fb	Uncertain	Small
134	9747	HBI	Oa	30	27.3	29.7	Oa	-999	Fb	Uncertain	Small
135	9749	HBI	Oa	32	27.3	29.7	Oa	-999	Fb	Uncertain	Small
136	9750	HBI	Oa	33	27.2	29.7	Oa	-999	Fb	Uncertain	Small
137	9751	HBI	Oa	34	27.2	29.7	Oa	-999	Fb	Uncertain	Small
138	9752	HBI	Oa	35	27.2	29.7	Oa	-999	Fb	Uncertain	Small
139	5765	SFB	B	56	27.3	29.7	Ä1	965	Fb, Geo	Uncertain	Small
140	5759	SFB	B	50	27.4	29.6	Ä1	942	Fb, Veg	Uncertain	Small
141	9748	HBI	Oa	31	27.3	29.7	Oa	-999	Fb	Uncertain	Small
142	6179	SFB	F	167	27.5	29.6	Ä3	6570	Fb, Geo	Uncertain	Small
143	6406	SFB	D	117	27.3	29.7	Ä2	7670	Fb	Uncertain	Small
144	5756	SFB	B	47	27.4	29.7	Ä1	923	Fb	Uncertain	Small
145	5764	SFB	B	55	27.4	29.6	Ä1	955	Fb	Middle Holocene	Middle
146	5749	SFB	B	40	27.4	29.8	Ä1	907	Fb, Geo	Middle Holocene	Middle
147	969	SFB	E	35	27.4	29.6	Ä3	81103	Fb, Veg	Uncertain	Small
148	6189	SFB	F	177	27.4	29.6	Ä3	6587	Fb	Uncertain	Small
149	970	SFB	E	36	27.4	29.6	Ä3	81105	Fb	Uncertain	Small
150	5867	SFB	B	240	27.4	29.6	Ä1	6050	Fb, Veg	Uncertain	Small
151	6184	SFB	F	172	27.4	29.6	Ä3	6581	Fb, Veg	Uncertain	Small
152	5763	SFB	B	54	27.4	29.6	Ä1	954	Fb	Uncertain	Small
153	6048	SFB	F	36	27.4	29.6	Ä3	933	Fb	Uncertain	Small
154	2125	SFB	C	727	27.3	29.6	Ä2	67601	Fb	Uncertain	Small
155	8740	SFB	E	679	27.4	29.7	Ä3	67483	Sb	Early Holocene	Small
156	7558	SFB	B	23	27.4	29.8	Ä1	42036	Sb	Middle Holocene	Small
157	8381	SFB	A	1238	27.5	29.8	Ä1	63691	Sb	Early Holocene	Small
158	8382	SFB	A	1239	27.5	29.8	Ä1	63697	Fp, Rm	Middle Holocene	Small

Djara

ID	Density	blank_prod	tools	Arrow	Dec_Beil	Grind	Hearth	OES	Fundpl	Survey
82	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
83	isolated		1	0	0	0	0	0	0	No Name no Name
84	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
85	isolated		0	1	0	0	0	1	0	No Name no Name
86	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
87	isolated		1	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
88	isolated		1	0	0	0	0	0	0	No Name no Name
89	isolated		1	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
90	isolated		1	0	0	0	0	0	0	No Name no Name
91	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
92	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
93	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
94	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
95	isolated		1	0	0	0	0	0	0	No Name no Name
96	isolated		1	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
97	isolated		1	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
98	isolated		0	0	0	0	1	0	0	No Name no Name
99	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
100	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
101	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
102	isolated		1	1	0	0	0	0	0	No Name no Name
103	isolated		1	1	0	0	0	1	0	No Name no Name
104	isolated		1	0	0	0	1	0	0	No Name no Name
105	isolated		1	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
106	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
107	isolated		0	1	0	0	0	0	0	No Name no Name
108	isolated		1	0	0	0	0	0	0	No Name no Name
109	isolated		1	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
110	isolated		0	1	0	0	0	0	0	No Name no Name
111	light		1	1	0	0	0	1	0	No Name no Name
112	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
113	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
114	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
115	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
116	light		1	1	0	0	0	0	0	No Name no Name
117	light		1	0	0	0	1	1	0	No Name no Name
118	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
119	isolated		0	1	0	0	0	0	0	No Name no Name
120	isolated		0	1	0	0	0	0	0	No Name no Name
121	isolated		0	1	0	0	0	0	0	No Name no Name
122	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
123	light		1	0	0	0	0	0	0	No Name no Name
124	isolated		1	0	0	0	0	0	0	No Name no Name
125	isolated		1	1	0	0	0	0	0	No Name no Name
126	dense		1	1	0	0	0	1	0	Ä98/20 Ä96/BG20
127	dense		1	1	1	1	1	1	1	Ä98/20 Ä96/BG20
128	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
129	isolated		1	0	0	0	0	0	0	No Name no Name
130	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
131	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
132	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
133	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
134	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
135	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
136	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
137	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
138	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
139	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
140	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
141	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
142	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
143	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
144	isolated		0	0	0	0	1	1	0	No Name no Name
145	light		0	1	0	0	0	1	0	No Name no Name
146	light		1	1	0	0	1	1	0	No Name no Name
147	isolated		0	1	0	0	0	0	0	No Name no Name
148	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
149	isolated		0	1	0	0	0	1	0	No Name no Name
150	isolated		1	0	0	0	0	0	0	No Name no Name
151	isolated		1	0	0	0	0	0	0	No Name no Name
152	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
153	isolated		0	0	0	0	0	1	0	No Name no Name
154	isolated		0	1	0	0	0	1	0	No Name no Name
155	dense		1	0	0	0	0	0	0	Ä98/18 Ä99/AP01
156	light		1	1	0	1	0	1	0	Ä98/19 Ä98/KK03
157	light		1	0	0	0	0	0	0	Ä99/11 Ä99/KK09
158	dense		1	1	0	0	0	0	0	Ä99/13 Ä99/KK10

Djara

ID	Beschreibung	x_UTM	y_UTM	Alt_m
82	Ein Steinplatz			174.5446
83	Einzelne Abschläge			195.4091
84	Einzelner Steinplatz			197.3641
85	Flache Senke in welliger, relativ ebener Landschaft, viel Flint-Thermoscherben, Kalkschutt, Kalkoutcrops, Vegetation, 1 Steinplatz, Mittelpaläolithische Levalloisabschläge, 1 Sideblow Flake			169.1194
86	Flache Senke mit Vegetation, Serir vereinzelt Kalkoutcrops, ein großer Steinplatz und ein angeschlagener Flint, einzelne Abschläge, Flint-Thermoscherben			175.2728
87	Fundplatz ca. 10 x 10m mit Abschlägen, Klingen und Straußenei, Hatiyet mit vereinzelten			173.6566
88	Fundplatz mit Artefakten und Klingen			167.2949
89	Fundplatz mit Steinplätzen in kleiner Senke, sehr wenige verstreute Abschläge und			194.6510
90	Große Hatiyet mit vereinzelten Abschlägen und Klingen; Abu Muharik endgültig durchquert			174.1028
91	Große Hatiyet mit vereinzelten Steinplätzen (keine Artefakte)			180.6467
92	Große Steinplätze			171.3854
93	Große Vegetationssenke mit Steinplätzen			183.2555
94	Großer Steinplatz			178.4202
95	Größere Senke mit vereinzelter Fundstreuung und Artefakten			189.1732
96	Größere Serir-Ebene, Steinplätze mit wenig Holzkohle und Abschlägen (unretuschiert)			181.4379
97	Größere Serir-Senke mit Steinplätzen (z.T. mit Holzkohle), umgeben von kleineren Hügeln, Hatiyet mit markantem, großem Busch und Kamelskelett. Abschläge, Reibstein und Klingen mit großem Schlagflächenrest (ähnlich Djara 90/1-2), Schlagplatz. Vermutlich wurde dieser Platz bereits bei Survey-Fahrten im Januar oder Februar 1996 aufgenommen.			171.8265
98	Hattiyet (ca. 15 Büsche), 1 Steinplatz			170.1755
100	Hattiyet (mehr als 100 Büsche); 1 Steinplatz			171.6530
101	Hattiyet (mehr als 50 Büsche), 1 Steinplatz			170.7933
102	Hattiyet mit 20 Büschen (große Büsche, Chenopodiaceen); Kerne, große Abschläge (teilw. kantennret.), wenige Klingen, Rundsabber (vereinzelt Keramik, Drehscheibenware)			172.2308
103	Hattiyet mit etwa 20 Büschen; 4 Steinplätze (Hk), wenige Abschläge, 1 Kern, 2 Fesselsteine, 1			175.0694
104	Im Trockenbuschbereich eines Wadis ein Reibstein vom Typ "Lobo", Kern, Abschläge			171.1264
105	Kleine Senke (ca. 50 m D) mit vereinzelten Büschen; einige Abschläge und Klingen (z. T. kantennretuschiert), 2 größere Steinplätze			183.1717
106	Kleine Senke mit Büschen und fünf Steinplätzen			188.1014
107	Kleine Senke mit einigen Büschen (Serir), Abschläge mit Kantenretusche			195.8996
108	Kleine Senke mit Serir bedeckt, einige, wenige Büsche; ein Abschlag und Straußenei			185.1901
109	Kleine Senke mit zwei Steinplätzen und einzelnen verschwommenen Abschlägen; wenige			206.6772
110	Markanter Geländepunkt mit Vegetation (Trockenbüschchen) in der Ebene, flächenretuschiert			188.4295
111	Mehrere Büsche in kleinem Wadi (Richtung E-SE); mehrere Steinplätze und Abschläge, Schaber,			169.5702
112	Mehrere Steinplätze			193.9793
113	Mehrere Steinplätze an Vegetationssenke in Serirfläche; 3 x Tamarix sp., Salsola cf. tetrandra			169.9708
114	Mehrere Steinplätze in großer Senke (Durchmesser der Steinplätze ca. 1.5m)			187.2709
115	Nachtlager zwischen kleinen Kalksteinküppen, südlich Djara 90/1; kleiner Steinplatz			194.6090
116	Offene Ebene nach kleiner Geländekuppe, von kleinen Wadis durchzogen; Schlagplatz mit Kernen, kantennretuschierten Abschlägen			194.5564
117	Reibstein und Reibschale, Abschläge, Steinplätze			193.4893
118	Sechs Steinplätze, in östlicher Richtung (ca. 102°) weitere Steinplätze			179.0344
119	Senke mit Büschen und einem flächig retuschierten Blatt			185.8495
120	Senke mit Steinplätzen und vereinzelten Artefakten (z.T. retuschiert)			170.3450
121	Senke mit Vegetation und flächenretuschierten Artefakten			163.5038
122	Senke mit Vegetation und Steinplätzen			170.7466
123	epipaläolithische Klingen), Kernen und Thermoscherben; kleine und große SFR; lockere Fundstreu 20x20m			193.6597
124	Serir-Senke mit Büschen; rezentes Playa (Tonlamellen), einige Abschläge, Levalloisklinge stark			183.8669
125	Serir-Senke mit Steinplätzen, Schaber und Abschläge			178.5592
126	Spitze Playarest A98/20: h = 215-216 +/- 3 m			173.6029
127	Spitze Playarest A98/20: h = 215-216 +/- 3 m			173.6029
128	Steinplatz			190.9022
129	Steinplatz mit Abschlägen und Thermofakten			166.7496
130	Steinplätze			196.4468
131	Steinplätze			189.3927
132	Steinplätze			181.2804
133	Steinplätze			180.3861
134	Steinplätze			191.0205
135	Steinplätze			194.1146
136	Steinplätze			189.7982
137	Steinplätze			190.8920
138	Steinplätze			197.2534
139	Steinplätze am Rande breiter Senke - Wadi?			191.1973
140	Steinplätze an Hatiyet mit Tamarisken			184.6132
141	Steinplätze in kleiner Senke			192.2472
142	Steinplätze in Senke			188.4658
143	Steinplätze mit Knochen			199.7074
144	Steinplätze, Reibstein?			172.2011
145	Steinplatzkonzentration mit flächenret. Artefakten (sehr variantenreich), vermutl. gr. Siedlungspl.			192.5387
146	Tief ausgearbeiteter Mahlstein mit Reibstein in einer Playasenke, vereinzelt Klingen, Abschläge mit großem Schlagflächenrest, Steinplätze und ein weiterer Reibstein, Foto			163.5472
147	Vegetationssenke (etwa 50 Büsche) mindestens 1 Fesselstein			182.5589
148	Vier bis fünf Steinplätze mit Holzkohle			178.8095
149	Vier Steinplätze, eine kleine kantennretuschierte Klinge			176.4271
150	Wadi mit Vegetation, Kalksteinhügel entlang des Wadis, Outcrops aus Kalk und Flint, einzelne Abschläge, Flint-Thermoscherben			174.9933
151	Wadi zwischen kleinen Hügeln mit Dornenbuschvegetation; einige Abschläge			176.3778
152	Weitere Steinplätze			193.0102
153	Zwei große Steinplätze			180.6233
154	Zwei Steinplätze und eine angeschlagene Thermoscherbe			203.4832
155	Kleine Senke mit Hatiyet (ca. 50 x 200 m) mit vereinzelten Abschlägen, wenigen groben, schaberartigen Abschlägen, Frostausprägungen und Flächenretusche			181.3404
156				174.6005
157				173.4844
158	RA99/KK1			182.8407

Djara

ID	Aspect_Deg	Topo_Index	Slope_Deg	flowacc	Geologie	Geol_cd	dstdrn	flwacc_x
82	238.4267	3.3504	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	30.0000	405951.0000
83	27.8483	1.2987	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	150.0000	278.0000
84	333.5108	0.8144	0.6752	1.0000	Tetn	3.0000	240.0000	235.0000
85	43.4777	0.3215	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	30.0000	793720.0000
86	14.2426	0.3762	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	60.0000	226.0000
87	276.7067	0.2412	0.6752	3.0000	Tetn	3.0000	84.8528	1980.0000
88	202.6488	0.1783	0.6752	8.0000	Tetn	3.0000	296.9849	286.0000
89	268.8018	2.0375	0.6752	26.0000	Tetn	3.0000	134.1641	1142.0000
90	189.9009	1.3957	0.6752	64.0000	Tei	2.0000	30.0000	1388.0000
91	286.1624	2.5745	0.6752	1.0000	Tetn	3.0000	42.4264	625.0000
92	2.5018	2.4373	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	150.0000	398706.0000
93	146.2447	2.3798	0.6752	0.0000	Tei	2.0000	120.0000	2470.0000
94	84.4011	0.2337	0.6752	280.0000	Tetn	3.0000	0.0000	281.0000
95	214.7623	0.3847	0.6752	21.0000	Tetn	3.0000	90.0000	1056.0000
96	325.2853	0.4532	0.6752	2.0000	Tetn	3.0000	169.7056	1731.0000
97	133.8205	2.3029	0.6752	7.0000	Tetn	3.0000	120.0000	5269.0000
98	152.2950	1.4220	0.6752	12.0000	Tetn	3.0000	30.0000	4496.0000
99	182.0734	1.9344	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	182.4829	845.0000
100	35.8161	0.2554	0.6752	10.0000	Tetn	3.0000	284.6050	275.0000
101	15.7289	0.3786	0.6752	9.0000	Tetn	3.0000	90.0000	8958.0000
102	229.4621	0.5505	0.6752	20.0000	Tei	2.0000	42.4264	1539.0000
103	162.4543	0.1740	0.6752	8.0000	Tei	2.0000	30.0000	521.0000
104	340.1528	0.3230	0.6752	11.0000	Tetn	3.0000	94.8683	391524.0000
105	322.5562	0.1117	0.6752	0.0000	Tei	2.0000	84.8528	315.0000
106	299.7055	0.4161	0.6752	4.0000	Tetn	3.0000	216.3331	260.0000
107	226.6081	0.5559	0.6752	23.0000	Tetn	3.0000	324.4996	6242.0000
108	36.0954	0.7560	0.6752	1.0000	Tetn	3.0000	424.2641	233.0000
109	85.9767	0.2997	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	150.0000	346.0000
110	302.9763	0.5407	0.6752	5.0000	Tetn	3.0000	180.0000	210.0000
111	173.0124	1.4834	0.6752	108.0000	Tei	2.0000	150.0000	57105.0000
112	143.4366	1.1601	0.6752	3.0000	Tetn	3.0000	134.1641	442.0000
113	220.5053	0.2249	0.6752	6.0000	Tetn	3.0000	0.0000	529.0000
114	190.1435	0.5579	0.6752	116.0000	Tetn	3.0000	30.0000	601.0000
115	286.3728	0.4601	0.6752	3.0000	Tetn	3.0000	390.0000	255.0000
116	151.6820	2.7215	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	67.0820	11732.0000
117	34.6325	1.0391	0.6752	2.0000	Tetn	3.0000	67.0820	351.0000
118	306.1960	0.6751	0.6752	3.0000	Tetn	3.0000	180.0000	413.0000
119	16.8243	0.2664	0.6752	1.0000	Tetn	3.0000	0.0000	44118.0000
120	19.4547	0.0938	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	416.7733	245.0000
121	316.5692	0.0043	0.6752	4407.0000	Tei	2.0000	0.0000	4407.0000
122	200.3980	0.3687	0.6752	1.0000	Tetn	3.0000	201.2461	322.0000
123	148.7462	1.2434	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	84.8528	255.0000
124	162.7715	0.2359	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	30.0000	49813.0000
125	278.8468	0.6855	0.6752	1.0000	Tetn	3.0000	60.0000	614.0000
126	314.2050	0.3261	0.6752	4.0000	Tetn	3.0000	30.0000	334148.0000
127	314.2050	0.3261	0.6752	4.0000	Tetn	3.0000	30.0000	334148.0000
128	336.4620	2.9948	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	174.9286	199741.0000
129	214.7066	0.5149	0.6752	2.0000	Tei	2.0000	150.0000	327.0000
130	132.1779	3.2573	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	108.1665	330.0000
131	117.5684	0.0000	0.6752	4.0000	Tetn	3.0000	30.0000	291.0000
132	310.9226	1.6867	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	240.0000	278.0000
133	0.3502	0.7263	0.6752	207.0000	Tetn	3.0000	0.0000	796.0000
134	224.2310	0.8091	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	84.8528	600.0000
135	113.3127	1.7679	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	123.6932	291.0000
136	153.0988	0.1968	0.6752	4.0000	Tetn	3.0000	180.0000	15375.0000
137	233.2976	5.0934	0.6752	1.0000	Tetn	3.0000	60.0000	3209.0000
138	350.1987	0.7612	0.6752	12.0000	Tetn	3.0000	300.0000	811.0000
139	262.0316	0.2105	0.6752	3.0000	Tetn	3.0000	30.0000	415.0000
140	67.0648	0.6590	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	240.0000	2944.0000
141	290.5068	0.4071	0.6752	2.0000	Tetn	3.0000	0.0000	1062.0000
142	274.9623	1.7624	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	67.0820	2826.0000
143	164.9835	0.6000	0.6752	3.0000	Tetn	3.0000	256.3201	2002.0000
144	269.6124	0.9546	0.6752	12.0000	Tetn	3.0000	0.0000	3834.0000
145	187.9039	0.1348	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	212.1320	2205.0000
146	277.5269	1.2543	0.6752	25.0000	Tei	2.0000	308.8689	986.0000
147	266.9353	1.4822	0.6752	0.0000	Tetn	3.0000	330.0000	259.0000
148	163.7175	2.3868	0.6752	1.0000	Tetn	3.0000	60.0000	207.0000
149	77.4819	1.2543	0.6752	5.0000	Tetn	3.0000	84.8528	3703.0000
150	299.7742	0.2357	0.6752	51499.0000	Tetn	3.0000	0.0000	51499.0000
151	319.9599	1.2057	0.6752	11.0000	Tetn	3.0000	30.0000	51474.0000
152	185.9154	0.1748	0.6752	6.0000	Tetn	3.0000	210.0000	459.0000
153	284.6429	1.7417	0.6752	3.0000	Tetn	3.0000	60.0000	15323.0000
154	324.4312	1.2933	0.6752	1.0000	Tetn	3.0000	349.8571	1100.0000
155	74.6644	0.7388	0.6752	2.0000	Tei	2.0000	268.3282	315.0000
156	297.8641	1.1738	0.6752	0.0000	Tei	2.0000	30.0000	1388.0000
157	135.8512	0.6370	0.6752	49.0000	Tei	2.0000	241.8677	202.0000
158	295.2662	2.1487	0.6752	0.0000	Tei	2.0000	424.2641	221.0000

Djara

ID	f1c_210	index_210X	index_210Y
82	121.0000		
83	354.0000		
84	16.0000		
85	793720.0000		
86	295.0000		
87	1978.0000		
88	96.0000		
89	442.0000		
90	1539.0000		
91	1085.0000		
92	17.0000		
93	20963.0000		
94	280.0000		
95	1657.0000		
96	23.0000		
97	72.0000		
98	5276.0000		
99	34.0000		
100	113.0000		
101	8959.0000		
102	471.0000		
103	540.0000		
104	175.0000		
105	130.0000		
106	69.0000		
107	131.0000		
108	33.0000		
109	138.0000		
110	59.0000		
111	211.0000		
112	29.0000		
113	529.0000		
114	602.0000		
115	8.0000		
116	11740.0000		
117	354.0000		
118	17.0000		
119	44201.0000		
120	123.0000		
121	6730.0000		
122	33.0000		
123	272.0000		
124	49862.0000		
125	951.0000		
126	334159.0000		
127	334159.0000		
128	103.0000		
129	30.0000		
130	9.0000		
131	2308.0000		
132	15.0000		
133	64648.0000		
134	9.0000		
135	87.0000		
136	89.0000		
137	9.0000		
138	16.0000		
139	2229.0000		
140	17.0000		
141	1064.0000		
142	2843.0000		
143	66.0000		
144	405294.0000		
145	2097.0000		
146	45.0000		
147	27.0000		
148	295.0000		
149	91.0000		
150	51513.0000		
151	51513.0000		
152	453.0000		
153	15609.0000		
154	42.0000		
155	130.0000		
156	2404.0000		
157	162.0000		
158	7.0000		

Regenfeld

ID	area	site_No	survey_No	WPT	N	E	age	size	density
1	Regenfeld	96/20			25.4	27.1	Early	middle	dense
2	Regenfeld	96/1-CI1	96KK9	D167	25.4	27.1	Early	middle	dense
3	Regenfeld		00JL1	B90	24.5	27.3	Early	middle	light
4	Regenfeld	96/19-CI2			25.4	27.1	Early	small	dense
5	Regenfeld			F623	24.8	27.4	Early	small	light
6	Regenfeld	96/19-CI1	96HR14	F682	25.4	27.1	Mid	middle	dense
7	Regenfeld	96/1-3			25.4	27.1	Mid	middle	dense
8	Regenfeld	96/1-CI4			25.4	27.1	Mid	middle	dense
9	Regenfeld	99/22	96KK7	D157	24.8	27.3	Mid	small	dense
10	Regenfeld	96/28		D153	24.7	27.3	Mid	middle	isolate
11	Regenfeld			D163	25.0	27.2	Mid	small	isolate
12	Regenfeld			D143	24.5	27.3	Mid	small	isolate
13	Regenfeld			F620	25.4	27.4	Mid	small	isolate
14	Regenfeld			F625	24.6	27.5	Mid	small	isolate
15	Regenfeld			F627	24.6	27.4	Mid	small	isolate
16	Regenfeld			F629	24.7	27.4	Mid	small	isolate
17	Regenfeld			F632	24.8	27.4	Mid	small	isolate
18	Regenfeld			F638	24.8	27.3	Mid	small	isolate
19	Regenfeld			F640	24.7	27.3	Mid	small	isolate
20	Regenfeld			F642	24.6	27.4	Mid	small	isolate
21	Regenfeld			F643	24.6	27.4	Mid	small	isolate
22	Regenfeld			F676	24.6	27.3	Mid	small	isolate
23	Regenfeld	97/3	97HR1		24.8	27.3	Mid	small	isolate
24	Regenfeld	96/15	96BP7	F686	24.8	27.2	Mid	middle	light
25	Regenfeld	99/27	96KK8	D158	24.9	27.3	Mid	large	light
26	Regenfeld		00HR45	B89	24.7	27.2	Mid	middle	light
27	Regenfeld	96/1-CI2			25.4	27.1	Mid	middle	light
28	Regenfeld	96/25	96KK10	D178	25.9	26.9	Mid	middle	light
29	Regenfeld			D162	25.0	27.2	Mid	small	light
30	Regenfeld			D145	24.6	27.3	Mid	small	light
31	Regenfeld			D141	24.5	27.3	Mid	small	light
32	Regenfeld			D172	25.4	27.1	Mid	small	light
33	Regenfeld			F616	25.2	27.5	Mid	small	light
34	Regenfeld			F621	25.5	27.3	Mid	small	light
35	Regenfeld			F637	24.8	27.3	Mid	small	light
36	Regenfeld			B84	24.7	27.3	Mid	small	light
37	Regenfeld			B69	24.7	27.3	Mid	small	light

Regenfeld

ID	blank_prod	tools	arrow	grinder	fire	OES	x_orig	y_orig	High_m
1		1	1	0	1	0			400.3222
2		1	1	1	1	1			343.2982
3		1	1	1	1	1	0		798.6990
4		1	1	1	1	0	0		373.4794
5		1	1	1	1	0	0		571.4274
6		1	1	1	1	1	1		392.5072
7		1	1	1	1	1	1		364.6205
8		1	1	1	1	1	1		446.6434
9		1	1	1	1	1	0		571.1028
10		1	0	0	0	0	0		589.6617
11		1	0	0	0	0	0		431.7115
12		1	1	0	1	0	0		726.7731
13		0	1	0	0	0	0		339.2282
14		0	1	0	1	0	0		539.4109
15		0	1	0	0	0	0		575.4944
16		0	0	0	1	0	0		591.4395
17		0	0	0	1	0	0		547.7322
18		0	1	0	0	0	0		533.8860
19		0	0	0	1	0	0		571.2320
20		1	0	0	0	0	0		603.1099
21		0	0	0	1	0	0		587.3250
22		0	0	0	1	0	0		632.1946
23		1	0	0	0	0	0		521.8206
24		1	1	1	1	1	0		524.3847
25		1	1	0	1	1	0		509.6421
26		1	0	0	0	0	0		606.4594
27		0	0	0	1	0	0		429.9010
28		1	1	0	1	1	1		-999.0000
29		1	0	0	1	0	0		388.6100
30		0	0	0	1	0	0		700.5206
31		1	0	0	1	0	0		710.7227
32		0	0	0	1	0	0		423.6120
33		1	1	0	0	0	0		447.3503
34		1	1	0	0	0	0		364.6557
35		1	1	0	1	0	0		589.2550
36		0	0	0	0	1	0		599.8224
37		1	0	0	1	0	0		550.8130

Regenfeld

ID	Slope_Deg	Aspect_Deg	Topo_Index	flowacc	Geologie	Geol_Cd
1	16.9016	286.5355	25.4323	-999.0000	Kuq	1
2	32.1937	314.6744	5.4264	3741.0000	Qd	2
3	6.5721	292.4019	6.5169	1008.0000	Kls	3
4	17.6347	221.5800	3.8087	7292.0000	Kuq	1
5	3.4137	354.3201	1.0272	147.0000	Qd	2
6	11.7273	122.4095	12.5951	5692.0000	Kuq	1
7	37.3569	331.4114	11.6169	-999.0000	Qd	2
8	6.9008	107.9089	16.9510	25859.0000	Qd	2
9	11.9156	343.6378	1.9847	211.0000	Kum	4
10	3.8467	173.4347	8.4832	207.0000	Kum	4
11	9.0911	226.2891	11.7426	1360719.0000	Kut	6
12	0.5900	160.0964	1.8102	9465.0000	Kls	3
13	3.4153	253.3571	2.0635	231.0000	Kuw	5
14	30.8680	203.7471	36.8024	7183.0000	Kls	3
15	3.8200	192.2357	2.4458	238735.0000	Kls	3
16	8.5834	144.1887	13.2771	1198.0000	Kls	3
17	4.9861	334.4012	0.3209	10.0000	Kum	4
18	6.8118	152.9644	10.9355	9131.0000	Kum	4
19	6.8555	175.2743	2.2222	3396.0000	Kum	4
20	3.4187	319.5729	3.3675	1301.0000	Kls	3
21	6.4760	203.3611	5.5989	1004.0000	Kls	3
22	5.5623	136.3848	8.0901	10635.0000	Kum	4
23	5.5630	258.0675	5.1575	839.0000	Kum	4
24	3.4489	322.6140	1.5456	20.0000	Kum	4
25	3.8790	189.0481	3.3143	340.0000	Kum	4
26	6.2637	110.9104	0.9791	0.0000	Kls	3
27	22.0459	78.4363	22.5399	-999.0000	Qd	2
28	-999.0000	-999.0000	-999	-999.0000	Qd	2
29	7.3810	324.9370	1.8549	1361053.0000	Qd	2
30	7.4680	177.8064	5.3800	535078.0000	Kls	3
31	47.4462	356.6204	8.7448	534667.0000	Qd	2
32	6.1537	23.7122	11.9074	321.0000	Kum	4
33	5.1900	327.6103	5.8735	1463.0000	Kuq	1
34	4.9122	70.7194	3.1435	2453.0000	Kuw	5
35	2.5952	211.6022	8.8753	380.0000	Kum	4
36	11.4210	267.1509	8.1894	83573.0000	Kum	4
37	20.7915	208.5766	6.2373	86291.0000	Kum	4

Regenfeld

ID	dstdrn	flwacc_x	flacc_210	fl_210_x	fl_210_y
1	300.0000	3445.0000	7808.0000		
2	30.0000	3741.0000	37706.0000		
3	254.5584	1008.0000	1186.0000		
4	234.3075	7292.0000	7310.0000		
5	1023.9629	147.0000	337.0000		
6	318.9044	5692.0000	5692.0000		
7	30.0000	3741.0000	37706.0000		
8	150.0000	25859.0000	25860.0000		
9	968.4008	211.0000	368.0000		
10	276.5863	207.0000	555.0000		
11	127.2792	1360719.0000	1360720.0000		
12	331.3608	9465.0000	9580.0000		
13	674.1661	231.0000	336.0000		
14	465.7253	7183.0000	7220.0000		
15	67.0820	238735.0000	238735.0000		
16	60.0000	1198.0000	1891.0000		
17	30.0000	10.0000	135420.0000		
18	192.0937	9131.0000	9132.0000		
19	0.0000	3396.0000	3401.0000		
20	241.8677	1301.0000	1301.0000		
21	872.0665	1004.0000	1032.0000		
22	42.4264	10635.0000	10674.0000		
23	127.2792	839.0000	877.0000		
24	931.9335	20.0000	209.0000		
25	276.5863	340.0000	340.0000		
26	342.0526	445.0000	451.0000		
27	212.1320	25859.0000	25860.0000		
28	-999.0000	-999.0000	-999.0000		
29	30.0000	1361053.0000	1361139.0000		
30	494.7727	402.0000	408.0000		
31	768.9603	266.0000	266.0000		
32	228.4732	321.0000	875.0000		
33	42.4264	1463.0000	1463.0000		
34	120.0000	2453.0000	2453.0000		
35	573.1492	380.0000	405.0000		
36	720.6248	83573.0000	83842.0000		
37	60.0000	86291.0000	86294.0000		

Erklärung gem. § 4, Abs. 9 der Promotionsordnung vom 2. Februar 2006

Ich versichere, dass ich die von mir vorgelegte Dissertation selbständig angefertigt, die benutzten Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben und die Stellen der Arbeit – einschließlich Tabellen, Karten und Abbildungen –, die anderen Werken im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, in jedem Einzelfall als Entlehnung kenntlich gemacht habe; dass diese Dissertation noch keiner anderen Fakultät oder Universität zur Prüfung vorgelegen hat; dass sie – abgesehen von unten angegebenen Teilpublikationen – noch nicht veröffentlicht worden ist sowie, dass ich eine solche Veröffentlichung vor Abschluss des Promotionsverfahrens nicht vornehmen werde.

Die Bestimmungen der Promotionsordnung sind mir bekannt.

Die von mir vorgelegte Dissertation ist von Univ.-Prof. Dr. U. Radtke betreut worden.

Andreas Bolten

Teilpublikationen:

BOLTEN, A., BUBENZER, O., DARIUS, F. (2006): A Digital Elevation Model as a Base for the Reconstruction of Holocene Land-Use Potential in Arid Regions. *Geoarchaeology: An International Journal* 21, 7: 751-762.

BUBENZER, O., BOLTEN, A. (in press): The use of new elevation data (SRTM/ASTER) for the detection and morphometric quantification of Pleistocene megadunes (draa) in the eastern Sahara and the southern Namib. *Geomorphology*.