



JANA EGER-KARBERG & TIM KARBERG

WASSER FÜR GALA ABU AHMED

EIN PALÄO-DRAINAGESYSTEM ZWISCHEN JEBEL NAGASCHUSCH UND WADI HOWAR (SUDAN) IM RADAR-SATELLITENBILD

I. EINLEITUNG

Wie bereits im vorigen Jahr konzentrierten sich auch im Jahr 2021 die Arbeiten des Projektes „Interregional Linkage Investigations in Northern Kordofan (InterLINK)“ der Westfälischen Wilhelms-Universität (WWU) Münster auf die Auswertung von Fernerkundungsdaten.¹ Während zunächst die Arbeit mit panchromatischen und multispektralen Satellitenaufnahmen im Vordergrund stand,² wurden im weiteren Projektverlauf auch zunehmend satellitengestützte Radarmessungen ausgewertet. Hierbei fanden sich Hinweise auf ein System von (heute flugsandbedeckten) Abflussrinnen, die vom Jebel al-Ain und vom Jebel Nagaschusch nach Norden entwässer(te)n und in das Wadi Howar münden. In der Nähe der Mündungen dieses Abflussrinnensystems zeigt das Wadi Howar zwei Ausbuchtungen bei 17°38'58"N29°39'45"E und 17°44'21"N29°56'55"E, die von signifikanten Oberflächenwasser-Einträgen in früheren Zeiten zeugen. Diese stehen offenbar mit den von Süden heranführenden Paläo-Wadis in Zusammenhang, sind jedoch aus dem Radar-Befund nicht absolut datierbar. In diesem Gebiet liegt auch die Festungsanlage Gala Abu Ahmed. Diese wurde wahrscheinlich im späten Neuen Reich errichtet und in Napatanischer Zeit weiter genutzt.³ Aufgrund

der engen topographischen Kontextualisierung der Festung mit dem östlichen dieser geo-historischen Oberflächenwasser-Indikatoren liegt es nahe, dass die Ortswahl für diesen Bau mit einer lokalen Gunstzone in Verbindung stand, die durch die Paläo-Wadis beeinflusst wurde. Die Gunstzone um die Festungsanlage wurde bislang vor allem durch möglichen Regenwassereintrag in unmittelbarer Umgebung erklärt,⁴ auch wenn eindeutige Indikatoren für verstärkte Regenfälle während der Nutzungszeit der Festung nicht vorliegen.⁵ Dieser Artikel zeigt, dass Zuflüsse aus potentiell regenreicheren Arealen im Süden existieren. Der Gunstraum um Gala Abu Ahmed kann damit stringenter als mit den bislang zu diesem Raum vorliegenden Überlegungen erklärt werden.

2. METHODIK

Die hier erstmals beschriebenen Paläo-Wadis sind an der rezenten Geländeoberfläche nicht mehr auszumachen, da sie durch Flugsand – teilweise sogar durch massive Barchanfelder – überdeckt sind. Daher sind sie weder auf modernen topographischen Karten eingezeichnet,⁶ noch in panchromatischen Satellitenbildern der rezenten Geländeoberfläche auszumachen (s. Abb. 1). Die Barchandünen, die den Lauf der ehemaligen Wadis teilweise überlagern, zeichnen sich im Satellitenbild hingegen deutlich ab.

Im Vergleich zum optischen Abbildungsbereich zeigen satellitengestützte Radaraufnahmen jedoch ein vollkommen anderes Bild. Für die Auswertung standen Radardaten zweier verschiedener Satellitensysteme zur Verfügung, die jedoch trotz technischer Unterschiede vergleichbare Befunde zeigen, die vom

1 Die Autoren danken Prof. Angelika Lohwasser für die Anbindung des Projektes an die „Forschungsstelle Alter Sudan“ am Institut für Ägyptologie und Koptologie der WWU Münster, sowie Prof. Huweida Mohammed (Universität Khartoum), Dr. Mariusz Drzewiecki (Universität Warschau), dem Institut für Geoinformatik der WWU Münster (besonders Dr. Torsten Prinz, Prof. Judith Verstege und Sven Oliver Pagel), Dr. Jörg Linstädter (Deutsches Archäologisches Institut) sowie den Teams des SPP „Entangled Africa“ und seiner Teilprojekte für die kollegiale Zusammenarbeit, und ganz besonders Prof. Baldur Gabriel für seine Unterstützung mit Rat und Tat.

2 Eger & Karberg, 2020, S. 87-89

3 Jesse, 2013.

4 Kröpelin, 1993, S. 138-139

5 Neumann, 1989, S. 153

6 Generalstab der Streitkräfte der UdSSR, 1979, S. Blatt E-35-G

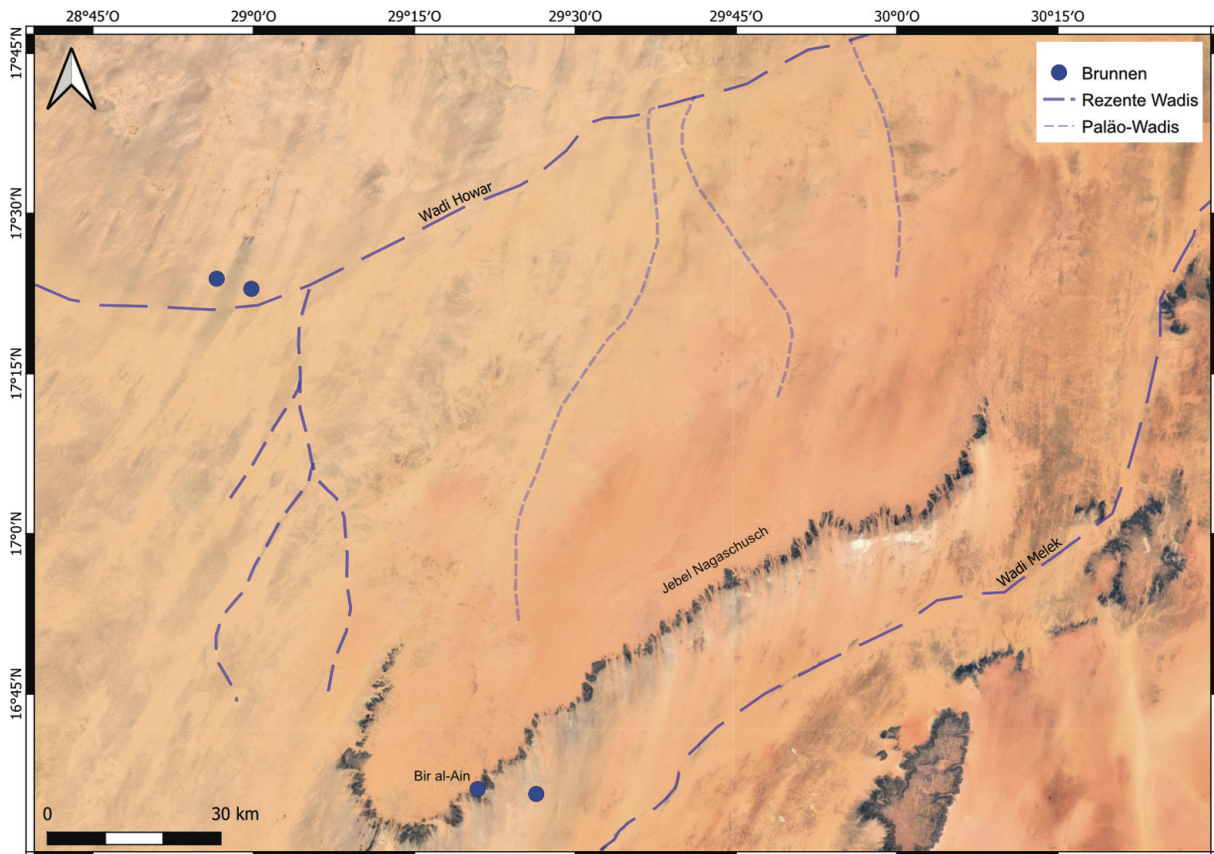


Abb. 1: Panchromatisches Satellitenbild der Landschaft zwischen Jebel Nagaschusch und Wadi Howar auf Grundlage von SPOT-Satellitenbildern (© Google Earth, 2020).

optischen Eindruck an der Geländeoberfläche deutlich abweichen.⁷

Im Zuge der Fernerkundungsarbeiten des InterLINK-Projektes wurden Daten der beiden Satellitenpaare TerraSAR-X/TanDEM-X sowie Sentinel 1-A und 1-B ausgewertet. Beide Satellitenpaare weisen spezifische Vor- und Nachteile auf, so dass sich aus der Verschränkung und gegenseitigen Ergänzung der Daten beider Systeme ein vollständigeres Lagebild erstellen lässt als durch Auswertung lediglich einer einzelnen Datenquelle.

Die Daten der TerraSAR-X/TanDEM-X-Mission stehen dem Projekt in prozessierter Form als hochaufgelöstes digitales Geländemodell zur Verfügung.⁸ Dieses Geländemodell wurde im Jahr 2016

durch das Fernerkundungsdatenzentrum des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und das Institut für Hochfrequenztechnik der DLR in Zusammenarbeit mit dem Geschäftsbereich „Defence and Space“ der Airbus SE erstellt und gibt – je nach Region – die Geländebeschaffenheit der Jahre 2011-2015 wieder.⁹ Die Datengewinnung erfolgt mittels eines Radarsystems mit synthetischer Apertur (die wiederholte Anmessung einzelner Geländepunkte in Flugrichtung und dadurch eine höhere Auflösung ermöglicht)¹⁰ im X-Band (9,65 GHz, λ 3,1 cm).¹¹ Die Auflösung der zur Verfügung stehenden prozessierten Daten beträgt 12 x 12 m, der absolute Höhenfehler unter einem Meter.¹² Dadurch werden Geländedetails sichtbar, die im Rahmen älterer radarbasierter digitaler Geländemodelle, wie beispielsweise des SRTM-Datensatzes, unsichtbar blieben.

Die genaue Lage der abgebildeten Ebene ist allerdings von der Geländebedeckung abhängig und ist

danken hierbei insbesondere Dr. Gunter Schreier und Dr. Thomas Busche für ihre vielfältige Unterstützung.

9 Buckreuß, et al., 2020, S. 39

10 Albertz, 2007, S. 57-58

11 Reinke & Werninghaus, 2009, S. 31

12 Buckreuß, et al., 2020, S. 39-40

7 Paläo-Drainagesysteme, die an der rezenten Geländeoberkante durch Sandbedeckung nicht auszumachen sind, können prinzipiell durch Auswertung von Radardaten erfasst werden. Dass dies bereits vor dem Vorliegen hochaufgelöster satellitengestützter Radaraufzeichnungen möglich war, zeigten Mitglieder einer Forschungsgruppe um Hans-Joachim Pachur (Pachur & Altmann, 1997, S. 111-116; Germer, 2001)

8 Diese Daten wurden dem Projekt durch das Fernerkundungsdatenzentrum des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen, im Rahmen einer Kooperation zur Verfügung gestellt. Die Autoren

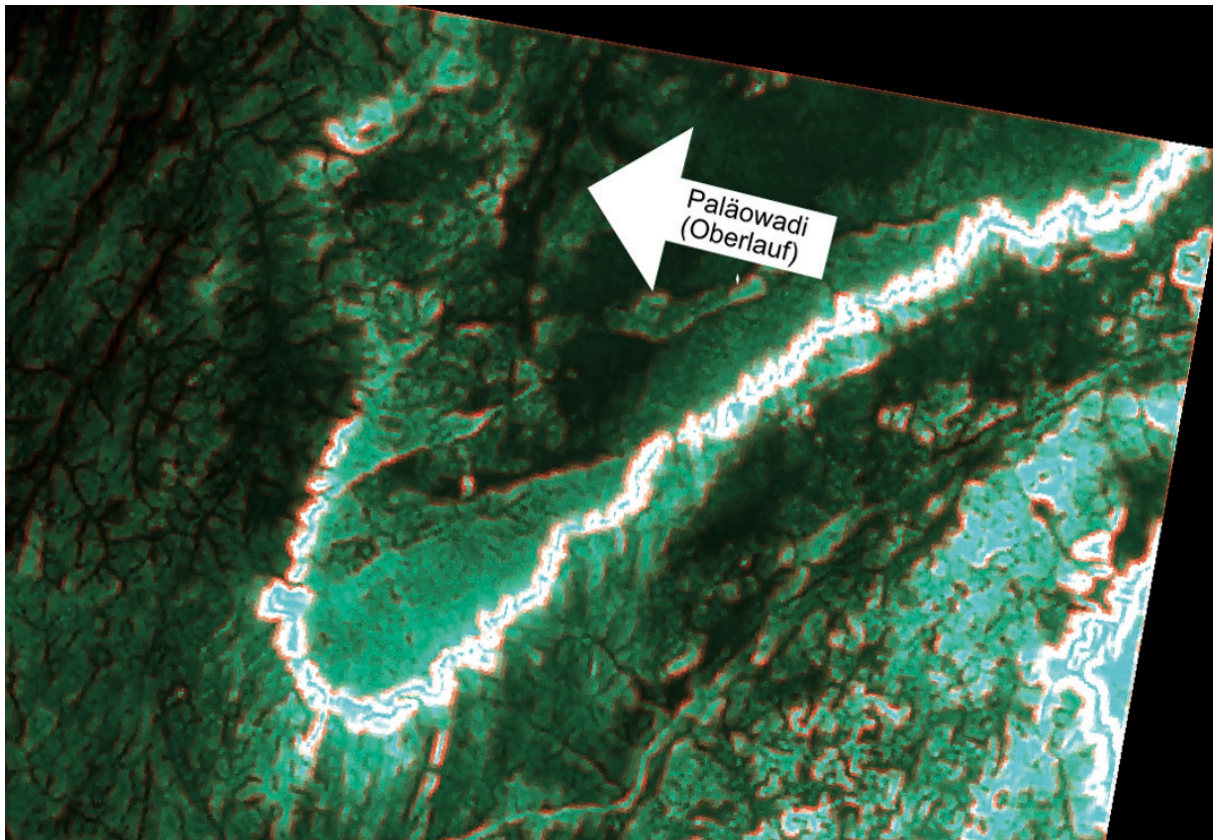


Abb. 2: Falschfarben-Visualisierung der Radarmessungen im C-Band (vh-Polarisation) des Satelliten Sentinel 1B in ERDAS Imagine (© Copernicus Program/ESA).

nach wie vor Gegenstand von Untersuchungen.¹³ Unter besonders trockenen Bedingungen mit hoher Bodendichte kann von einer Eindringtiefe des X-Band-Radars von bis zu 25 cm ausgegangen werden.¹⁴ Die Eindringtiefe von X-Band-Radar unter ebenso trockenen Bedingungen, aber niedrigerer Bodendichte in äolisch akkumuliertem Lockermaterial unterschiedlicher Struktur wird noch untersucht. Allgemein ist jedoch davon auszugehen, dass diese bei weniger verdichteten Böden größer ist, und im Falle lockerer, feinkörniger, tonarmer und vor allem trockener Sandakkumulationen bis zu einem Meter betragen kann.¹⁵

Neben den prozessierten Daten der TerraSAR-X- und TanDEM-X-Satelliten wurden auch Radardaten des Satellitenpaares Sentinel 1-A und 1-B ausgewertet. Neben den eigentlichen Rohdaten („single look complex“) stehen hierfür über das Copernicus-Erdbeobachtungsprogramm der ESA auch georeferenzierte Bilddaten unterschiedlicher Polarisationen zur Verfügung.¹⁶ Die Satelliten der Sentinel-1-Reihe

verwenden ebenfalls ein Radarsystem mit synthetischer Apertur, jedoch im C-Band (5,405 GHz, λ 6,0 cm).¹⁷ Die Auflösung beträgt dabei im besten Fall ca. 9 m x 9 m.¹⁸ Im C-Band wird eine höhere Eindringtiefe erreicht (Abb. 2), das Reflexionsverhalten an verschiedenen Materialoberflächen unterscheidet sich jedoch deutlich vom X-Band.¹⁹

Zu Vergleichszwecken – vor allem, um die Auswirkungen der Paläo-Drainagesysteme auf die aktuelle Geländeoberfläche und eventuell noch aktive Aquifere zu untersuchen – wurden weitere prozessierte Radardaten, und daneben (vor allem hinsichtlich Pflanzenbewuchs) auch multispektrale und panchromatische optische Satellitendaten analysiert.²⁰ Dabei kamen unter anderem zeitlich im Monatsbereich aufgelöste Bodenfeuchte-Messungen zum Einsatz, die durch die europäische Wetter-satellitenbetriebsorganisation EUMETSAT mittels des ASCAT-Radarinstrumentes an Bord der Satelliten der MetOp-Reihe erstellt werden.²¹

13 Linck, et al., 2014, S. 58-63

14 Linck, et al., 2014, S. 62; Linck, et al., 2013, S. 42-43

15 Schaber, et al., 1997, S. 360-361; vgl. auch Albertz, 2007, S. 61-63

16 Fletcher, 2012, S. 35-37

17 Fletcher, 2012, S. 21-22

18 Fletcher, 2012, S. 78-79

19 Albertz, 2007, S. 59

20 Zu den für die Auswertung optischer Satellitendaten verwendeten Methoden s. Eger & Karberg, 2020, S. 87-88

21 EUMETSAT, 2017, S. 39-40



3. BESCHREIBUNG DER PALÄO-WADIS

Die hier beschriebenen Paläo-Wadisysteme bestehen aus drei unabhängigen Zuflüssen zum Wadi Howar (Abb. 3). Ein vierter Zufluss westlich des Jebel al-Ain hingegen scheint auch rezent nicht überformt und – zumindest episodisch – noch aktiv zu sein.

Die längste der Abflussrinnen weist im Bereich des Plateaus des Jebel al-Ain und des Jebel Nagaschusch ein Regenwasser-Einzugsgebiet (catchment area) von etwas über 1300 km² auf. Die beiden kleineren östlichen Abflussrinnen besitzen auf demselben Plateau ein gemeinsames catchment area von ca. 1500 km². Alle drei Abflussrinnen münden entlang eines insgesamt ca. 36 km langen Uferabschnittes nacheinander in das Wadi Howar. Im Bereich dieses Abschnitts weitet sich das Wadi Howar streckenweise in mehrere Hauptarme auf, während das erweiterte Wadibett (einschließlich der Hoch- und Niederfluterrassen) eine deutliche Aufbauchung aufweist. Beide Geländemerkmale weisen auf einen erweiterten Oberflächenwassereintrag in den Hauptwadiverlauf während ihrer Entstehungsphase hin.

Pachur und Altmann gingen (auf der Grundlage von Feldforschungen und Fernerkundungsdaten) davon aus, dass das Wadi Howar im Holozän – neben seinem eigenen Oberlauf – lediglich durch das Wadi Magrur oberhalb der Jebel-Rahib-Schwelle und einige lokale, aus Richtung Norden einfließende Tributäre gespeist wurde.²² Besondere Bedeutung käme demnach lediglich dem Wadi Magrur als dominierendem Zufluss zu, da sich das catchment area dieses aus dem Süden einfließenden Wadis noch in rezenter Zeit außerhalb der hyperariden Klimazone befindet, und daher auch nach dem Ende des Höhepunktes der *African Humid Period* einen episodischen Oberflächenwassereintrag möglich machte.²³ Die hier beschriebenen Paläo-Drainagesysteme tragen allerdings ebenfalls von Süden her, und damit aus potentiell regenreicheren Regionen, Wasser in das Wadi-Howar-System ein. Das infolge des Plateau-Charakters des Jebel Nagaschusch relativ große Regenwasser-Sammelgebiet am Oberlauf der Abflussrinnen könnte noch nach dem Ende der *African Humid Period* zu Oberflächenwasservorkommen beigetragen haben: Das catchment area aller drei Paläo-Drainagerinnen liegt zwar aktuell nördlich der 200-mm-Isohyete,²⁴ jedoch ist für historische Epochen (z.B. für regionale Gunstepisoden wie die *Medieval Climate Anomaly*, die *Roman Warm*

Period oder auch frühere Episoden) eine nördliche Verschiebung der entsprechenden Niederschlagszonen wahrscheinlich.²⁵

4. DATIERUNG UND KONTEXT

Aus den vorliegenden Fernerkundungsdaten ist es kaum möglich, festzustellen, wann die im Radarbild auszumachenden Rinnen durch Oberflächenwasser geformt wurden. Fest steht, dass alle drei Rinnen heute nicht mehr aktiv sind, da sie über weite Teile ihres Verlaufs durch Flugsand bis hin zu Dünenbildung überdeckt und daher an der rezenten Geländeoberfläche nicht auszumachen sind. Die äolischen Sandbewegungsmuster und damit das Alter der Rinnenverläufe teilweise überlagernden Flugsandakkumulationen (bis hin zu Barchan-Dünenfeldern) sind bis heute in dieser Region nur unzureichend erforscht,²⁶ solange die Dünen noch aktiv und nicht fossilisiert sind.²⁷ Ein Zusammenhang des Festungsbaus in Gala Abu Ahmed mit einer lokalen Gunstzone wurde bereits vor Beginn der dortigen Flächenausgrabungen vermutet.²⁸ Die Möglichkeit eines topographisch nahe liegenden Oberflächen- oder Grundwassereintrags in diesen Abschnitt des Wadi Howar spielte dabei allerdings noch keine Rolle. Dennoch schließen sich die Autoren dieser prinzipiellen Überlegung an: Hierbei scheint es wahrscheinlich, dass während der ursprünglichen Bauzeit der Festung (möglicherweise im ägyptischen späten Neuen Reich)²⁹ die hier beschriebenen Paläo-Drainagesysteme zumindest noch als Führungsrin-

22 Pachur & Altmann, 2006, S. 239-241

23 Pachur & Altmann, 2006, S. 239

24 Williams 2019, 20 Fig. 3.1

25 Für die Roman Warm Period im Wadi Howar vgl. Kröpelin, 1993, S. 245-246, Abb. 52

26 Vgl. auch Gabriel, 1986, S. 66-68

27 Pachur & Altmann, 2006, S. 243-244

28 Pachur und Altmann äußern sich hierzu nur allgemein (Pachur & Altmann, 2006, S. 242-243); Kröpelin kann sich – in Unkenntnis südlicher Tributäre in diesem Bereich – die Gunstzone um Gala Abu Ahmed nur durch lokale Regenfälle beeinflusst vorstellen (Kröpelin, 1993, S. 139). Bodenkundliche Untersuchungen in Kooperation mit dem DFG-Projekt „An den Grenzen der Macht“ unter der Leitung von Friederike Jesse ergaben Hinweise auf oberflächennahes Wasser bis ca. 1500 BCE (Prays, et al., 2016, S. 47-50), jüngere Epochen konnten hierbei jedoch infolge der Erosion oberflächennäherer Bodenschichten nicht erfasst werden (mündliche Mitteilung Andreas Gundelwein). Hinweise auf Sedimentation durch Oberflächenwasser in der Nähe des Festungsbaus ergaben Daten von ca. 1200 BCE (Jesse, 2005, S. 33). Das Weiterbestehen der Gunstzone um Gala Abu Ahmed über diese Daten hinaus ist paläoökologisch bislang nicht belegt, erscheint aufgrund der Nutzung der Festung aber wahrscheinlich.

29 Jesse, 2013, S. 344-345

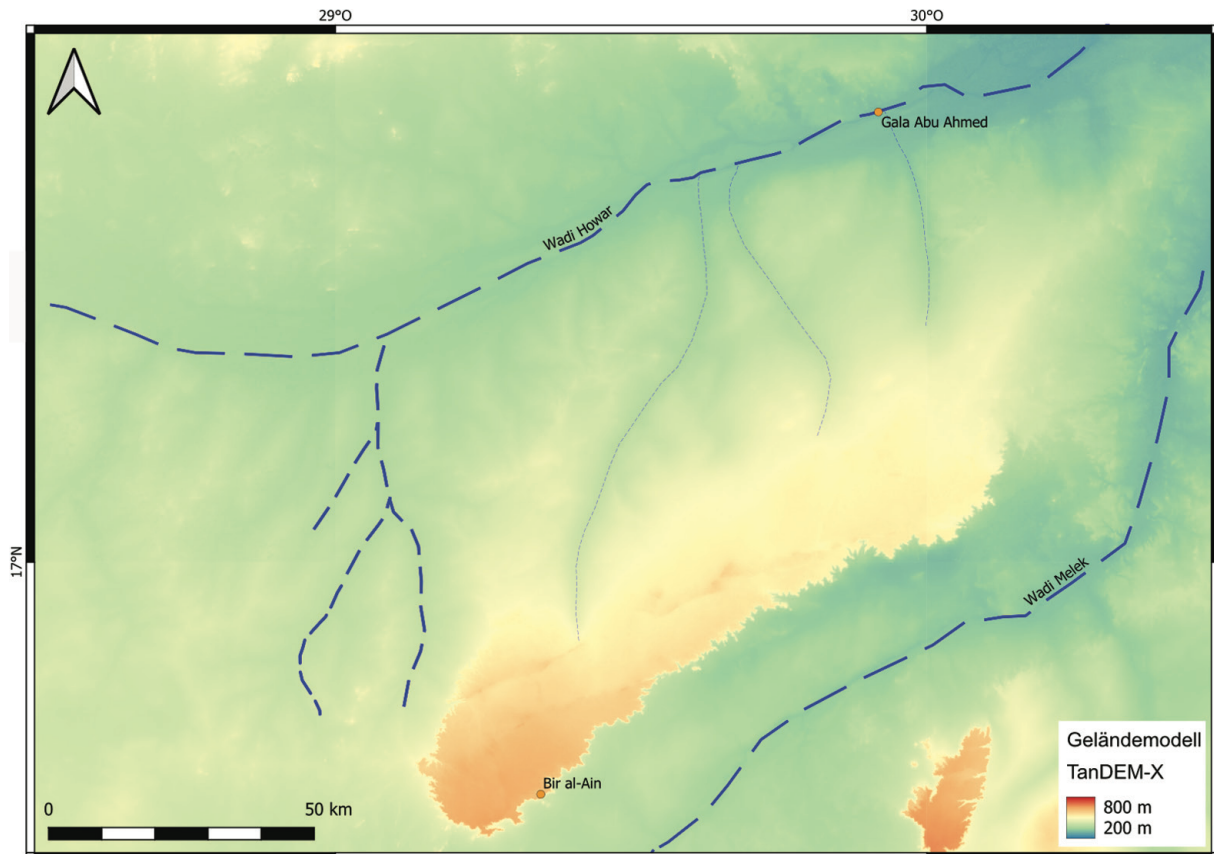


Abb. 3: Visualisierung des WorldDEM auf Basis von TerraSAR-X/TanDEM-X-Radardaten (© DLR).

nen unterirdischer Aquifere anzusehen sind. Auch wenn sie sicherlich nicht mehr an der damaligen Geländeoberfläche Oberflächenwasser führten, könnte eine zumindest unterirdische Aktivität der Drainage vom Plateau des Jebel al-Ain und des Jebel Nagaschusch ins untere Wadi Howar zu dieser Zeit nach wie vor zur Formation dieses Gunstraumes beigetragen haben.

Aus rezenten Daten kann jedoch kaum noch auf Aktivität dieses Drainagesystems geschlossen werden. Als Kenndaten hierfür können folgende drei Datenkategorien herangezogen werden: Bodenfeuchtigkeit, Pflanzenbewuchs und die Existenz von Brunnen. Bodenfeuchtigkeit gehört ebenfalls zu den Geländeparametern, die aus Radardaten abgeleitet werden können. Die Autoren griffen dabei auf ein prozessiertes Datenprodukt zurück, das durch EUMETSAT zur wissenschaftlichen Auswertung frei zur Verfügung gestellt wird.³⁰ Die Bodenfeuchtigkeit wird hierbei monatsgenau durch Radarmessungen im C-Band der Wettersatelliten MetOp berechnet. Aufgrund der überdurchschnittlichen Regenfälle der Sommer-Regenzeit des Jahres 2020

³⁰ Der Download erfolgte über das Integrated Climate Data Center der Universität Hamburg (URL: <https://www.cen.uni-hamburg.de/icdc/data/land/ascats-soilmoisture.html>; Zugriff: 26.08.2021)

im Sudan mit Spitzenniederschlägen in den Monaten August und September wurde der September 2020 als Datensatz gewählt, um den unter derzeitigen Klimabedingungen maximalen Feuchtigkeitsdurchsatz beurteilen zu können. Die Rohdaten codieren eine relative Bodenfeuchtigkeit, die in Prozentangaben zwischen den minimalen und maximalen globalen Messwerten angegeben und räumlich in Pixeln von 12 x 12 km aufgelöst sind. Trotz dieser recht groben Auflösung ist eine näherungsweise Kontextualisierung der Bodenfeuchtigkeitsdaten mit geographischen Gegebenheiten möglich. Zur Sichtbarmachung auch verhältnismäßig geringer Feuchtigkeitsdifferenzen wurde mittels GIS die Darstellung der relativen, prozentualen Attributwerte (0-100 in der Originaldatei) auf die Werte 0-15 eingegrenzt (Abb. 4). Hierbei zeichnen sich die Verläufe der Paläo-Drainagesysteme in der rezenten Bodenfeuchtigkeitsverteilung nur in sehr geringem Maße ab. Zwar zeigen die Oberläufe der Abflussrinnen mit relativen Feuchtigkeitskennziffern von 5 bis 7 einen messbar höheren Wert als die außerhalb liegenden Wüstengebiete (dort 0 bis 1), und auch die Mündungen der Paläo-Wadis in das Wadi Howar zeigen mit einem Wert von 2 (gegenüber 1 außerhalb der Mündungszonen) noch einen leicht gesteigerten Bodenfeuchtigkeitswert. Dies wird jedoch dadurch relativiert, dass das etwas

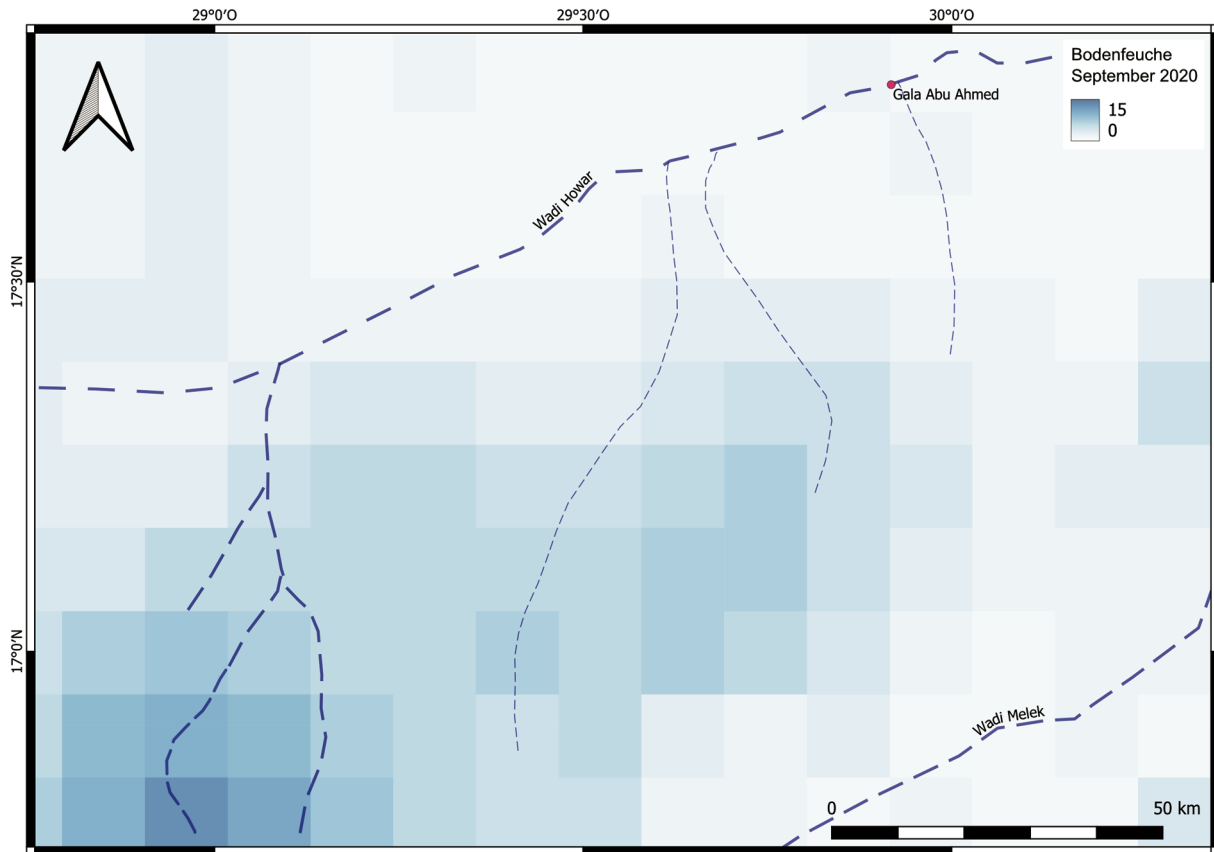


Abb. 4: Bodenfeuchte zwischen Jebel Nagashush und Wadi Howar im September 2020 (auf Basis von Daten des ASCAT-Instruments der MetOp-Satellitenreihe, © EUMETSAT).

weiter westlich parallel verlaufende, noch heute episodisch aktive Wadi zur selben Zeit im Oberlauf Werte zwischen 11 und 15 aufweist, und zeitgleich (hier durch direkten Regeneinfall) sogar nördlich des Wadi Howar in einzelnen Geländeabschnitten Werte von bis zu 13 erreicht werden. Insgesamt ist daher aus den Bodenfeuchtwerten zu schließen, dass auch während besonders regenreicher Wetterepisoden die hier beschriebenen Drainagesysteme kaum noch messbare Aktivität zeigen.

Ein ähnliches Bild ergibt sich durch die Auswertung von Vegetationsspuren. Zur Erfassung der Vegetation wurden multispektrale optische Aufnahmen des Satellitenpaares Sentinel 2 A-B ausgewertet. Dabei kam eine Clusteranalyse der Frequenzbänder 2-8 sowie 11-12 der Multispectral Instruments der beiden Satelliten zur Anwendung.³¹ In Anlehnung an das Konzept des *Normalized Difference Vegetation Index* lag der Schwerpunkt hierbei auf den Bändern 7-8a (nahes Infrarot) sowie 4-7 (optisches

Rot).³² Da unmittelbar nach starken Regenfällen ein Anstieg der Vegetationsaktivität anzunehmen ist, wurden auch für diese Analyse Daten gewählt, die die Situation unmittelbar nach den überdurchschnittlichen Regenepisoden des Sommers und Frühherbstes 2020 abbilden.³³ Hierbei konnte zwischen unterschiedlichen Bewuchsintensitäten differenziert werden. Diese konnten durch Vergleich mit eigenen Beobachtungen im Feld in den Jahren 2017 bis 2018 als Baumbewuchs (überwiegend entlang des Wadi Melek), Busch- bzw. Tundub-Bestand, sowie geschlossener oder unterbrochener Grasdecke identifiziert werden (Abb. 5). Auswertbare Daten aus Sentinel-2-Aufnahmen standen nur für den südlichen Abschnitt des Gebietes zwischen Jebel Nagashush und Wadi Howar (und damit die Oberläufe der hier beschriebenen Abflussrinnen) zur Verfügung. Dennoch zeigen die Daten deutlich, dass der oben bereits erwähnte, nach wie vor episodisch aktive Wadilauf westlich des Jebel al-Ain im Oberlauf geschlossen, in seinem mittleren Lauf zumindest streckenweise mit Vegetations-Gunstzonen assoziiert ist. Für die

31 Die Analyse erfolgte mit Hilfe des Computerprogramms ERDAS Imagine. Eine Lizenz wurde dem Projekt im Rahmen der Kooperation mit dem Institut für Geoinformatik der WWU Münster freundlicherweise durch die ivvGeo zur Verfügung gestellt.

32 Zu den theoretischen Grundlagen vgl. Tucker, 1979; Tucker, et al., 2005

33 Das Aufnahmedatum der ausgewählten Sentinel-2-Daten ist der 15.09.2020.

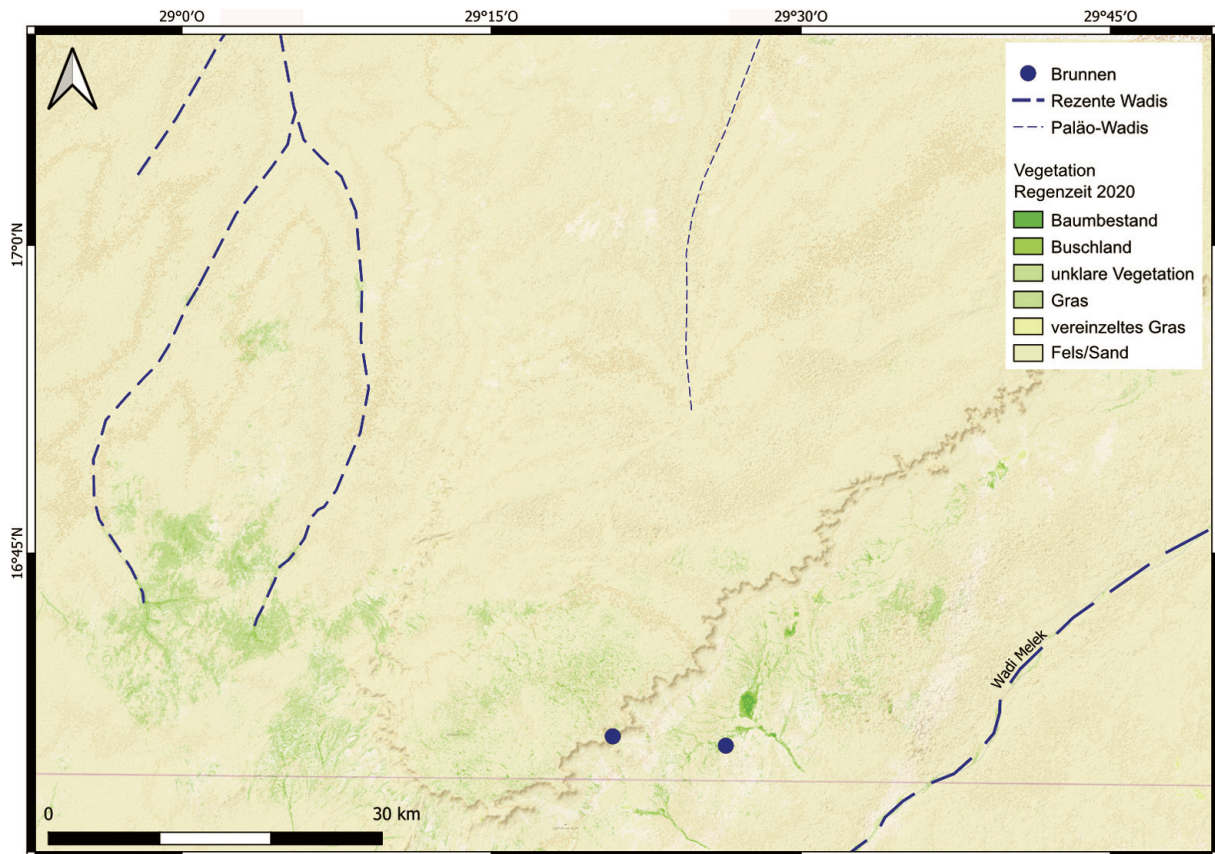


Abb. 5: Vegetationsbedeckung am 15. September 2020 (Clusteranalyse in ERDAS Imagine auf Basis von multispektralen Daten des Satelliten Sentinel 2B, © Copernicus Program/ESA).

drei Paläo-Wadis ist eine vergleichbare Vergesellschaftung mit Vegetation hingegen nicht feststellbar. Lediglich an einem kurzen Abschnitt eines der drei Paläo-Wadis ist eine Fläche aufgelockerten Grasbewuchses aufzufassen – da diese in der Nähe von Calciumcarbonat-Ablagerungen (Seekreide) liegt, ist diese aber wahrscheinlich eher auf eine lokale Oberflächenwasseransammlung als auf Grundwasser zurückzuführen (Abb. 6).

Ein hypothetischer unterirdischer Aquifer entlang der Paläo-Wadis unterhalb der rezenten Flugsanddecke würde darüber hinaus die Möglichkeit zur Anlage von Brunnen eröffnen. Aufgrund ihrer Bedeutung in einem ariden Raum sind dauerhaft Wasser führende Brunnen in der Regel in topographischen Kartenwerken eingetragen; zusätzlich sind sie durch bauliche Anlagen (Stabilisierung des Brunnenschachtes durch Mauerverschalung, Anlage von Tränkungsbecken für Vieh) sowie sternförmig aus der weiteren Umgebung auf den Brunnen zuführende Pfade in der Regel leicht im (optischen) Satellitenbild auszumachen (vgl. Abb. 7). Beides ist entlang der Paläo-Wadiläufe nicht der Fall: Weder sind hier Brunnen in der (für die Region nach wie vor den kartographischen Standard darstellenden)

sowjetischen Generalstabskarte eingezeichnet,³⁴ noch sind Brunnenmerkmale im hoch aufgelösten panchromatischen Satellitenbild auszumachen.³⁵ Der einzige Brunnen im Abflussgebiet der hier vorgestellten Paläo-Wadis wurde nahe der Festung Gala Abu Ahmed im archäologischen Befund festgestellt.³⁶ Aufgrund der oben dargestellten geologischen Gegebenheiten in der unmittelbaren Umgebung ist davon auszugehen, dass ein Grundwassereintrag aus Richtung des Jebel Nagaschusch in Richtung unteres Wadi Howar signifikant zur Speisung dieses Brunnens in historischer Zeit beigetragen haben dürfte. Die Datierung des Brunnens ist trotz archäologischer Untersuchungen vor Ort allerdings nach wie vor ungeklärt,³⁷ so dass ein Zusammenhang

34 Generalstab der Streitkräfte der UdSSR, 1979

35 Hierfür wurden Bilder des Satelliten WorldView-3 der Firma DigitalGlobe ausgewertet. Zugriff erfolgte über den Webservice Microsoft Bing Maps (URL: <https://www.bing.com/maps>; Zugriff: 26.08.2021).

36 Jesse, 2013, S. 323-324

37 Ein C¹⁴-Datum (ca. 1200 calBCE) von der Außenseite des Brunnens (Jesse, 2013, S. 236) ist hinsichtlich der stratigraphischen Anbindung an die Brunnenarmierung unklar. Bodenkundliche Untersuchungen ergaben für die Zeit nach 1200 BCE keine verwertbaren Ergebnisse (s.o. Fn. 29).

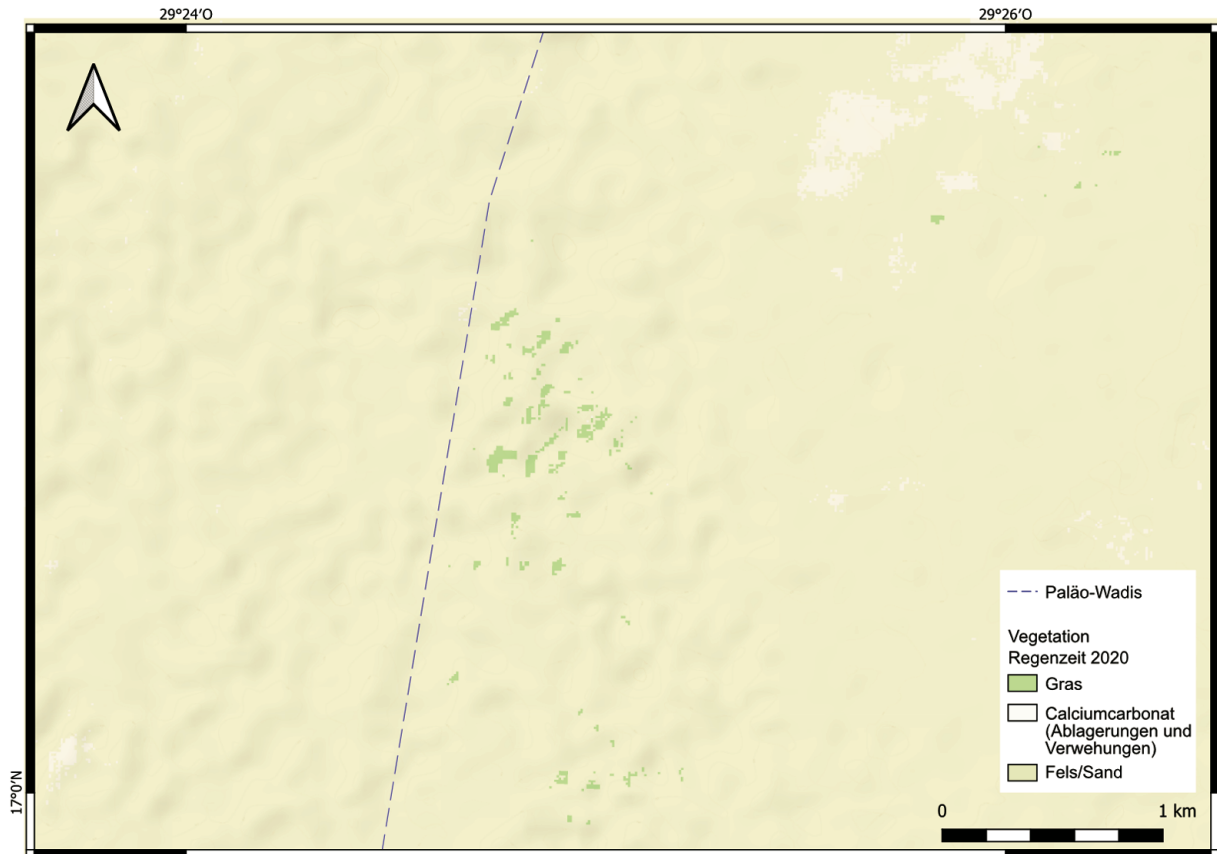


Abb. 6: Vegetationsdetail im Bereich des westlichen Palao-Wadis (Clusteranalyse in ERDAS Imagine auf Basis von multispektralen Daten des Satelliten Sentinel 2B, © Copernicus Program/ESA).

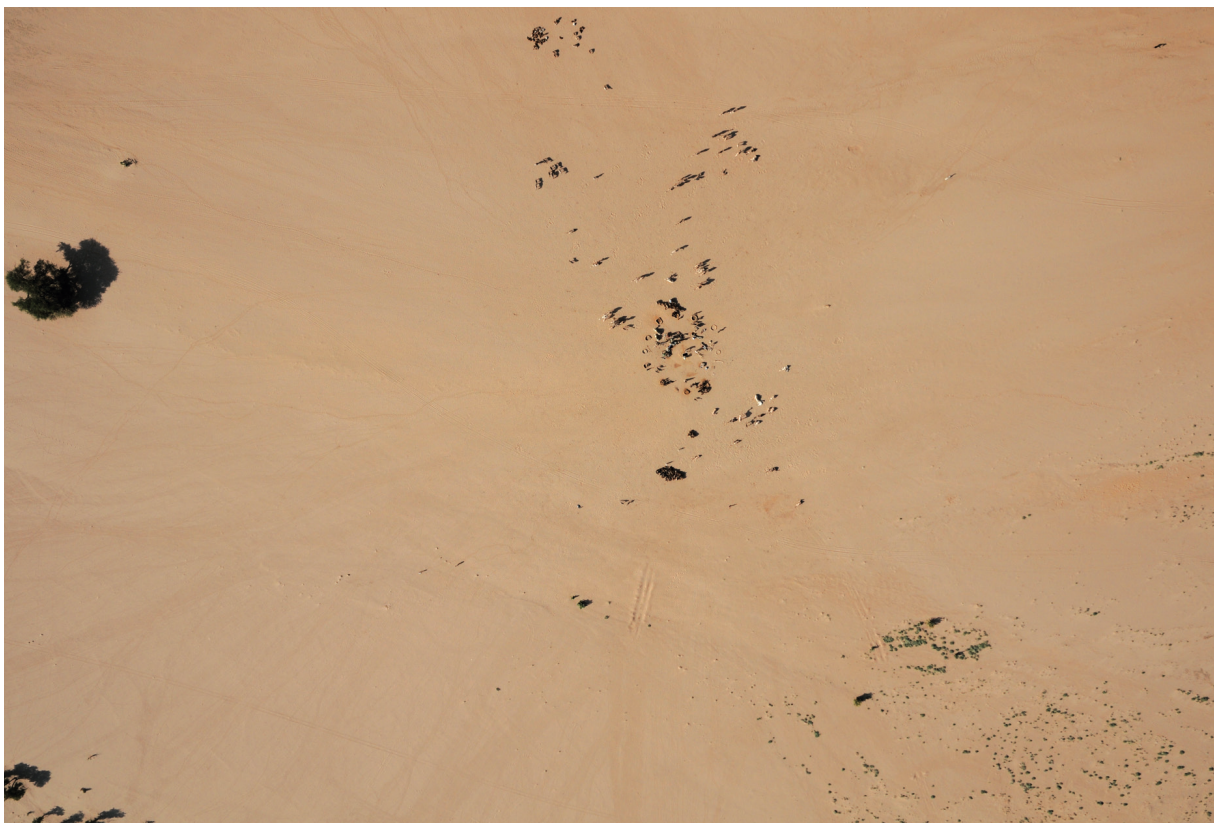


Abb. 7: Luftaufnahme eines rezenten Brunnen im Wadi Abu Dom mit Viehtränke-Installationen und sternförmig angeordneten Anmarschpfaden (Foto: Hans-Peter Thamm, © Wadi Abu Dom Itinerary Project).



mit dem benachbarten Festungsbau (und damit eine Datierung eines aktiven zumindest unterirdischen Wasserabflusses durch die hier vorgestellten Paläo-Wadis) lediglich vermutet werden kann.

5. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Die Kontextualisierung der Radardaten der Satellitenpaare TerraSAR-X/TanDEM-X- und Sentinel-1A und 1B mit prozessierten Bodenfeuchte- und Vegetationsdaten legt nahe, dass von einem heute – auch in Episoden stark überdurchschnittlichen Wassereintrags – inaktiven Drainagesystem ausgegangen werden kann. Ob Grundwasser im unteren Wadi Howar eher – wie Pachur und Altmann annehmen – aus dem Oberlauf des eigentlichen Wadi Howar sowie aus dem aus Richtung Süden oberhalb der Jebel-Rahib-Schwelle zulaufenden Wadi Magrur stammt,³⁸ oder in historischer Zeit auch nennenswert durch direkten Zufluss aus dem Süden aus dem Bereich des Jebel al-Ain und des Jebel Nagasch beeinflusst war, kann ohne weitere umfassende hydrologische und archäologische Forschungen im Gelände nicht mit Sicherheit geklärt werden. Die topographische Korrelation der oben beschriebenen Ausbuchtungen und Auffächerungen des Wadi Howar im Bereich der Einmündungen der hier beschriebenen Drainagesysteme könnten jedoch auf weitere Interpretation hindeuten. In diesem Fall würde der Bau der Festung Gala Abu Ahmed in einer wahrscheinlichen ökologischen Gunstzone, vor allem jedoch die Anlage des benachbarten Brunnens einen *terminus post quem* für die vollständige (auch unterirdische) Deaktivierung des Drainagesystems darstellen.

Neben Arbeiten im Gelände können detailliertere Untersuchungen aber auch in Zukunft durch Anwendung fortschrittlicher Fernerkundungstechnik durchgeführt werden: Als Nachfolge- und Ergänzungsmision der TerraSAR-X/TanDEM-X-Mission wird durch das DLR derzeit eine neue Radar-Satellitenmission geplant. Das TanDEM-L-System soll im L-Band Messungen durchführen, wobei Wellenlängen bis zu 30 cm zur Anwendung kommen, die ein Eindringen von bis zu 2 m tief in trockenes, tonarmes, lockeres, sandiges Erdmaterial ermöglichen sollen.³⁹ Auch wenn die langwellige Radarstrahlung vor allem – ähnlich LiDAR – zur

Erfassung der Geländeoberfläche unter dichten Baumkronen und ähnlicher Vegetation dienen soll,⁴⁰ ist der Nutzen dieser Daten für die archäologische Forschung vor allem in hyperariden Räumen evident. Daten, die heute nur durch die teure sowie logistisch und administrativ aufwändige Nutzung bodengebundenen ground penetrating radar (GPR) zu erheben wären, könnten so in naher Zukunft durch Fernerkundung gewonnen werden, was die Entdeckung nicht nur überformter Geländeformationen wie der hier beschriebenen Paläo-Wadis, sondern z.B. auch von überdünten Brunnen oder Gebäudestrukturen möglich machen würde.

SUMMARY

The analysis of spaceborne radar data from different satellite systems working in the X- and C-band resulted in the discovery of some palaeo-drainage systems leading from the Jebel Nagashush northwards to the lower Wadi Howar. They seem to be topographically correlated to the area of the fortress of Gala Abu Ahmed. Despite the fact that these palaeo-wadis seem to be inactive today, and their absolute date can so far not be determined, it seems likely that in former times they contributed to the ecologically favoured zone which was controlled by the fortress of Gala Abu Ahmed.

BIBLIOGRAPHIE

- Albertz, J., 2007. *Einführung in die Fernerkundung - Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern*. 3. Aufl. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Buckreuß, S., Zink, M. & Moreira, A., 2020. Die Mission TanDEM-X. *Luft- und Raumfahrt*, 2020(4), S. 38-41.
- Eger, J. & Karberg, T., 2020. Nord-Kordofan im Satellitenbild. Vorbericht über die Forschungen des InterLINK-Projektes 2020. *Der antike Sudan. MittSAG*, Band 31, S. 87-98.
- Eineder, M. et al., 2018. *Tandem-L: Vorschlag für eine Satellitenmission zur Erfassung von dynamischen Prozessen auf der Erdoberfläche*. Oberpfaffenhofen: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme.
- EUMETSAT Hrsg., 2017. *ASCAT User Guide*. Darmstadt: EUMETSAT.

38 Pachur & Altmann, 2006, S. 238-243; 276-287

39 Eineder, et al., 2018; bezüglich der allgemeinen Eigenschaften des Radar-L-Bandes in der paläo-ökologischen Fernerkundung vgl. auch Schaber, et al., 1997, S. 351 Tab. 2

40 Eineder, et al., 2018, S. 15-17



- Fletcher, K., Hrsg., 2012. *Sentinel-1: ESA's Radar Observatory Mission for GMES Operational Services*. Noordwijk: ESA Communications.
- Gabriel, B., 1986. *Die östliche Libysche Wüste im Jungquartär. Berliner Geographische Studien 19*. Berlin: Institut für Geographie der Technischen Universität Berlin.
- Generalstab der Streitkräfte der UdSSR Hrsg., 1979. *Generalstabskarte 1:200.000 Blatt E-35-G Abu Tabara*. Moskau: Главное управление геодезии и картографии при Совете министров СССР.
- Germer, S., 2001. *Fernerkundung und sedimentologische Untersuchungen zur Paläohydrographie des Kufra-Beckens/Libyen*. Berlin: Geographisches Institut der Humboldt-Universität zu Berlin (Diplomarbeit).
- Jesse, F., 2005. Rock art in Lower Wadi Howar, northwest Sudan. *Sahara*, Band 16, S. 27-38.
- Jesse, F., 2013. Far from the Nile - The Gala Abu Ahmed Fortress in the Lower Wadi Howar (Northern Sudan). In: F. Jesse & C. Vogel, Hrsg. *The Power of Walls*. Köln: Heinrich-Barth-Institut, S. 321-352.
- Kröpelin, S., 1993. *Zur Rekonstruktion der spätquartären Umwelt am Unteren Wadi Howar*. Berlin: Geomorphologisches Labor der Freien Universität.
- Linck, R., Buckreuf, S. & Seren, S., 2013. Determination of the Applicability of High-Resolution X-Band Satellite Radar for the Archaeological Prospection by a Comparison with a Ground-Based Survey. In: W. Neubauer, I. Trinks, R. B. Salisbury & C. Einwögerer, Hrsg. *Archaeological Prospection. Proceedings of the 10th International Conference*. Wien: Austrian Academy of Sciences Press, S. 41-43.
- Linck, R., Busche, T. & Buckreuf, S., 2014. Visual Analysis of TerraSAR-X Backscatter Imagery for Archaeological Prospection. *Journal for Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 82(1), S. 55-65.
- Neumann, K., 1989. Vegetationsgeschichte der Ostsahara im Holozän. Holzkohlen aus prähistorischen Fundstellen. In: R. Kuper, Hrsg. *Forschungen zur Umweltgeschichte der Ostsahara. Africa Praehistorica 2*. Köln: Heinrich-Barth-Institut, S. 301-334.
- Pachur, H.-J. & Altmann, N., 1997. The Quaternary (Holocene, ca. 8000 a BP). In: H. Schandemeier, S. O. Reynolds & A. K. Semtner, Hrsg. *Paleogeographic-Paleotectonic Atlas of North-Eastern Africa, Arabia, and adjacent areas*. Rotterdam: Balkema, S. 111-125.
- Pachur, H.-J. & Altmann, N., 2006. *Die Ostsahara im Spätquartär. Ökosystemwandel im größten hyperariden Raum der Erde*. Berlin: Springer.
- Prays, N., Lang, F., Kaupenjohann, M. & Gundelwein, A., 2016. Water supply of the fortress Gala Abu Ahmed. In: D. Sigari, Hrsg. *TRACCE Rock Art Bulletin Special Issue on the Occasion of the Valcamonica Summer Fieldschool*. Valcamonica: Cooperativa Archeologica Le Orme dell'Uomo, S. 41-53.
- Reinke, N. & Werninghaus, R., 2009. *TerraSAR-X - Das deutsche Radar-Auge im All*. Köln: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.
- Schaber, G., McCauley, J. & Breed, C., 1997. The Use of Multifrequency and Polarimetric SIR-C/X-SAR Data in Geologic Studies of Bir Safsaf, Egypt. *Remote Sensing of Environment*, 59(2), S. 337-363.
- Tucker, C. J., 1979. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), S. 127-150.
- Tucker, C. J. et al., 2005. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(20), S. 4485-4498.
- Williams, M., 2019. *The Nile Basin. Quaternary Geology, Geomorphology and Prehistoric Environments*. Cambridge: Cambridge University Press.