

MINIMALINVASIVE *DIRECT-PUSH*-ERKUNDUNG IN DER FEUCHTBODEN(GEO)ARCHÄOLOGIE AM BEISPIEL DES KARLSGRABENS (*FOSSA CAROLINA*)

Besonders in Gebieten mit geringen Grundwasserflurabständen ist die Durchführung von archäologischen Grabungen an Bodendenkmälern mit vielen Schwierigkeiten verbunden. Neben hohen Kosten und großem Aufwand für die Stabilisierung der Grabungsränder (Werther/Feiner 2014) sind umfangreiche Maßnahmen zur Wasserhaltung (Bates/Bates 2000; Doran 2013) nötig. Entgegen dem Leitbild der Bodendenkmalpflege wird das Bauwerk durch den Eingriff häufig zerstört und Funde müssen nach der Bergung aufwendig konserviert werden. Rammkernsondierungen sind mit einem geringeren Eingriff in das Bodendenkmal verbunden und bieten eine alternative Methode zur archäologischen Grabung. Diese erfassen das Bauwerk jedoch nur punktuell und liefern aufgrund von Stauchungseffekten insbesondere bei organischen Schichten keine einwandfreien Tiefenangaben (Leitholdt u. a. 2012; Leitholdt/Krüger/Zielhofer 2014; Hausmann u. a. 2018). Die Anwendung von *Direct-push*-Methoden (wörtl. Übersetzung: »direktes Drücken«) bietet hier neue und umfangreiche Möglichkeiten zur *In-situ*-Erkundung durch das Eindringen verschiedener Messsonden mit geringem Durchmesser in den Untergrund (Dietrich/Leven 2009). Die vorliegende Studie gibt einen Einblick in die flexible, minimalinvasive und kosteneffiziente Technologie für Anwendungen in der Feuchtbodenarchäologie. Am Beispiel des Karlsgrabens (*Fossa Carolina*) soll die tiefengenaue Beschreibung der Aushubstrukturen erfolgen. Weiterhin soll geklärt werden, welche Arten von Grabenfüllungen vorhanden sind und wie die Verfüllung vonstattenging. Für diese Analyse werden sowohl die verschiedenen *Direct-push*-Methoden als auch konventionelle Ansprachen aus Rammkernsondierungen gegenübergestellt und ausgewertet.

HISTORISCHE UND GEOGRAPHISCHE GRUNDLAGEN

Der Karlsgraben ist ein frühmittelalterlicher Kanal auf Höhe der Europäischen Hauptwasserscheide in Mittelfranken und liegt etwa 6 km südwestlich von Weißenburg (Lkr. Weißenburg-Gunzenhausen; **Abb. 1a**). Das Bauwerk wurde 793 durch Karl den Großen initiiert, wie durch die historischen Quellen belegt ist (Hack 2014; Nelson 2015). Durch die dendrochronologische Datierung (Werther u. a. 2015) wurde dieser Zeitraum naturwissenschaftlich bestätigt. Der Kanal sollte als schiffbarer Verkehrsweg die Europäische Hauptwasserscheide queren und eine Verbindung zwischen der Schwäbischen Rezat (Rhein-Main-Einzugsgebiet) und der Altmühl (Donau-Einzugsgebiet) herstellen. Somit wäre eine durchgehende Schifffahrtsverbindung zwischen der Nordsee und dem Schwarzen Meer möglich gewesen. Die Wasserscheide verläuft nördlich des Treuchtlinger Talknotens als Talwasserscheide innerhalb des Schichtstufenlandes der Südlichen Frankenalb. An dieser Stelle beträgt der Abstand der beiden zu verbindenden Fließgewässer lediglich ca. 2 km (**Abb. 1b**) und bietet somit eine ausgesprochen günstige Geländedeposition für einen Kanalbau (Leitholdt u. a. 2012; Zielhofer u. a. 2014; Zielhofer/Kirchner 2014).

Der oberflächennahe Untergrund im Bereich der Talwasserscheide ist durch spätpleistozäne sandig-tonige Talfüllungen gekennzeichnet (Schmidt-Kaler 1976). Ein geringer Grundwasserflurabstand charakterisiert den Talraum und führte zur Bildung eines Niedermoors in der Rezatniederung (Zielhofer/Kirchner 2014).

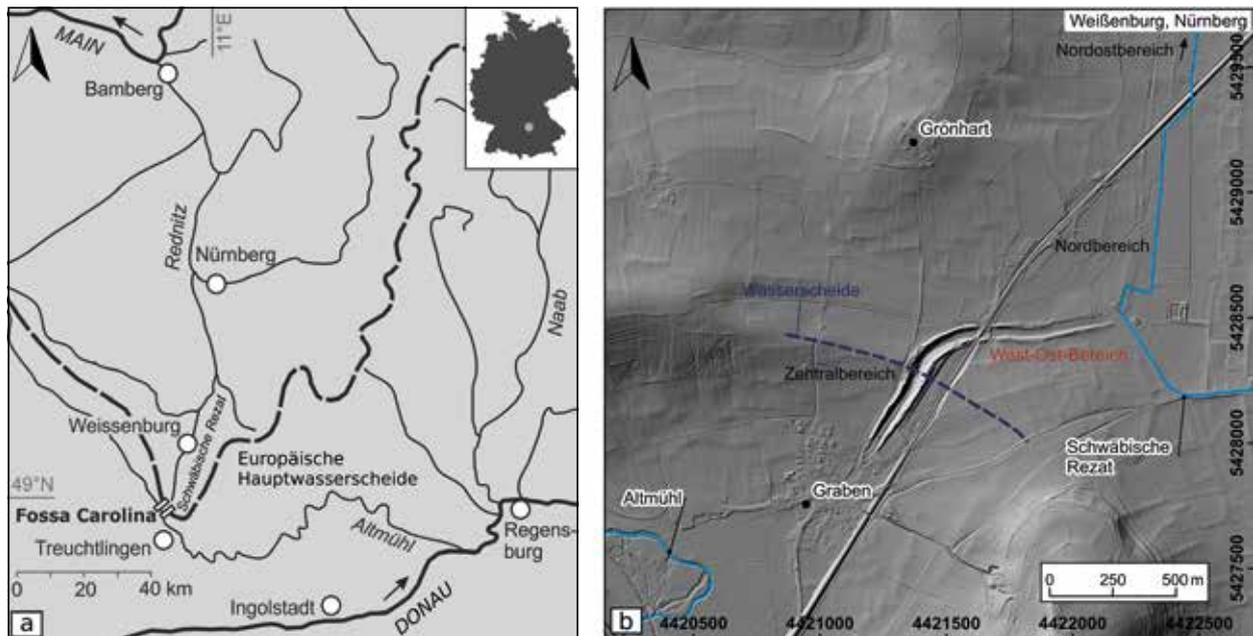


Abb. 1 a Der Karlsgraben südlich von Nürnberg quert die Europäische Hauptwasserscheide zwischen Schwäbischer Rezat (Rhein-Main-Einzugsgebiet) und Altmühl (Donau-Einzugsgebiet). – b Die Wasserscheide verläuft dabei in einem Tal zwischen den Ortschaften Grönhart und Graben (Lkr. Weißenburg-Gunzenhausen). Das Untersuchungsgebiet liegt im West-Ost-Bereich des Karlsgrabens. – (Graphik J. Völlmer; a verändert nach Zielhofer u. a. 2014, 2 Abb. 1b; b Datengrundlage LIDAR/Bayerische Vermessungsverwaltung, OpenStreet-Map).

Der Karlsgraben gliedert sich im Untersuchungsgebiet in verschiedene Abschnitte (**Abb. 1b**). Der Zentralbereich liegt nördlich des Ortsteils Graben in der Gemeinde Treuchtlingen (Lkr. Weißenburg-Gunzenhausen). An dieser Stelle wird die Wasserscheide durchbrochen, was durch die heute noch erhaltenen, bis zu 10m hohen Aushubwälle deutlich wird. Die Überreste des Bauwerks werden heute als Teich genutzt. Der West-Ost-Bereich ist vollständig verlandet, wobei ein schmaler Entwässerungsgraben in der Mitte der ca. 30m breiten Grabenverfüllung verläuft und somit bereits auf den geringen Grundwasserflurabstand hinweist. In diesem Bereich wurde unsere Studie durchgeführt. Den dritten Abschnitt bildet die nördliche Verlängerung des Bauwerks bis zur heutigen Bahnstrecke. Hier ist der Graben beinahe vollständig eingeebnet und durch Grünland oder Ackerflächen überprägt. Die weitere Verlängerung des Karlsgrabens Richtung Weißenburg verläuft nordöstlich der Bahnstrecke und ist heute an der Oberfläche kaum noch sichtbar. Der nördliche und der nordöstliche Bereich werden östlich von der Schwäbischen Rezat und dem damit einhergehenden Rezatried flankiert. Südlich des Ortes Graben beginnt die Aue der heutigen Altmühl (Koch 1996; Berg-Hobohm/Werther 2014; Zielhofer u. a. 2014).

FORSCHUNGSSTAND

Am Karlsgraben fanden seit 2010 umfangreiche geophysikalische, geoarchäologische und archäologische Untersuchungen zum karolingerzeitlichen Ausbauzustand, aber auch zur nachfolgenden Verlandungsgeschichte statt. Diese kann für den West-Ost-Bereich in fünf Phasen (vgl. Zielhofer u. a. 2014) gefasst werden, die auch durch Ausgrabungen im nördlichen Bereich bestätigt wurden (Werther u. a. 2015): Der präkarolingische Untergrund (I) besteht aus fluvial verlagerten, organikarmen, sandig-tonigen Sedimenten des Quartärs (Schmidt-Kaler 1993; Zielhofer/Kirchner 2014), in denen das Bauwerk angelegt wurde.



Abb. 2 Sondierarbeiten mit der Geoprobe 6610DT am Karlsgraben. – (Foto F. Möckel).

Aufgrund unterschiedlicher Sohl-niveaus wird eine Weihertreppenkonstruktion für den West-Ost-Bereich angenommen (Zielhofer u. a. 2014). Die ersten Grabenfüllungen nach der frühmittelalterlichen Aushubphase (II) sind geprägt durch erste umgelagerte organische Reste in den initialen Verfüllungen. Bei der zeitlichen Einordnung von Holzfragmenten ergaben sich kalibrierte ^{14}C -Alter im Zeitraum von 660 bis 730, bei denen mit Altholzeffekten zu rechnen ist (Leitholdt u. a. 2014; Zielhofer u. a. 2014). Weiter im Norden wurde diese Schicht dendrochronologisch anhand von Eichenbohlen (Fälldatum) auf das Jahr 793 datiert (Werther u. a. 2015). Darüber folgen weitere sandige Verfüllungen aus Rutschungen kurz nach dem Bau sowie feinere Sedimente frühmittelalterlicher Weiher (III) (Leitholdt u. a. 2014). Faulschlamm- und Torfbildungen weisen auf ein semiterrestrisches Milieu und Stillwasserbedingungen hin. Während des Hochmittelalters bis zum 13. Jahrhundert (IV) kam es zu weiteren Torf- und Faulschlambildungen. In der letzten Phase (V) verlandete der Bereich endgültig (Leitholdt/Krüger/Zielhofer 2014).

Aufgrund von Sohl-tiefen der karolingerzeitlichen Baugrube deutlich über 5 m unter der rezenten Oberfläche war es bislang nicht möglich, diesen Bereich des Bauwerks mit einer höheren Detailgenauigkeit zu untersuchen oder archäologische Grabungen durchzuführen. Besonders die genauen Dimensionen der Rinne, konstruktive Merkmale und eine höhengenaue Auflösung von Kanalsohle und Verfüllschichten konnten bisher nicht erfasst werden (Werther u. a. 2015). Um dieses Defizit zu beheben, wurde seit 2014 damit begonnen, *Direct-push*-Methoden am Karlsgraben einzusetzen (Hausmann u. a. 2018).

IN-SITU DIRECT-PUSH-METHODEN

Die *Direct-push*-Technologie bezeichnet generell eine Reihe an Methoden, bei der ein Hohlgestänge mit geringem Durchmesser in den oberflächennahen und nicht verfestigten Untergrund gedrückt oder gehäm-mert wird (Dietrich/Leven 2009; Leven u. a. 2011). Es steht eine Auswahl von unterschiedlichen minimal-invasiven Verfahren und Sonden zur Verfügung. Mittels mobiler Sondiergeräte, z. B. der in dieser Studie eingesetzten mobilen Sondier-raupe (Abb. 2), werden diese räumlich flexibel und zeiteffektiv angewendet.

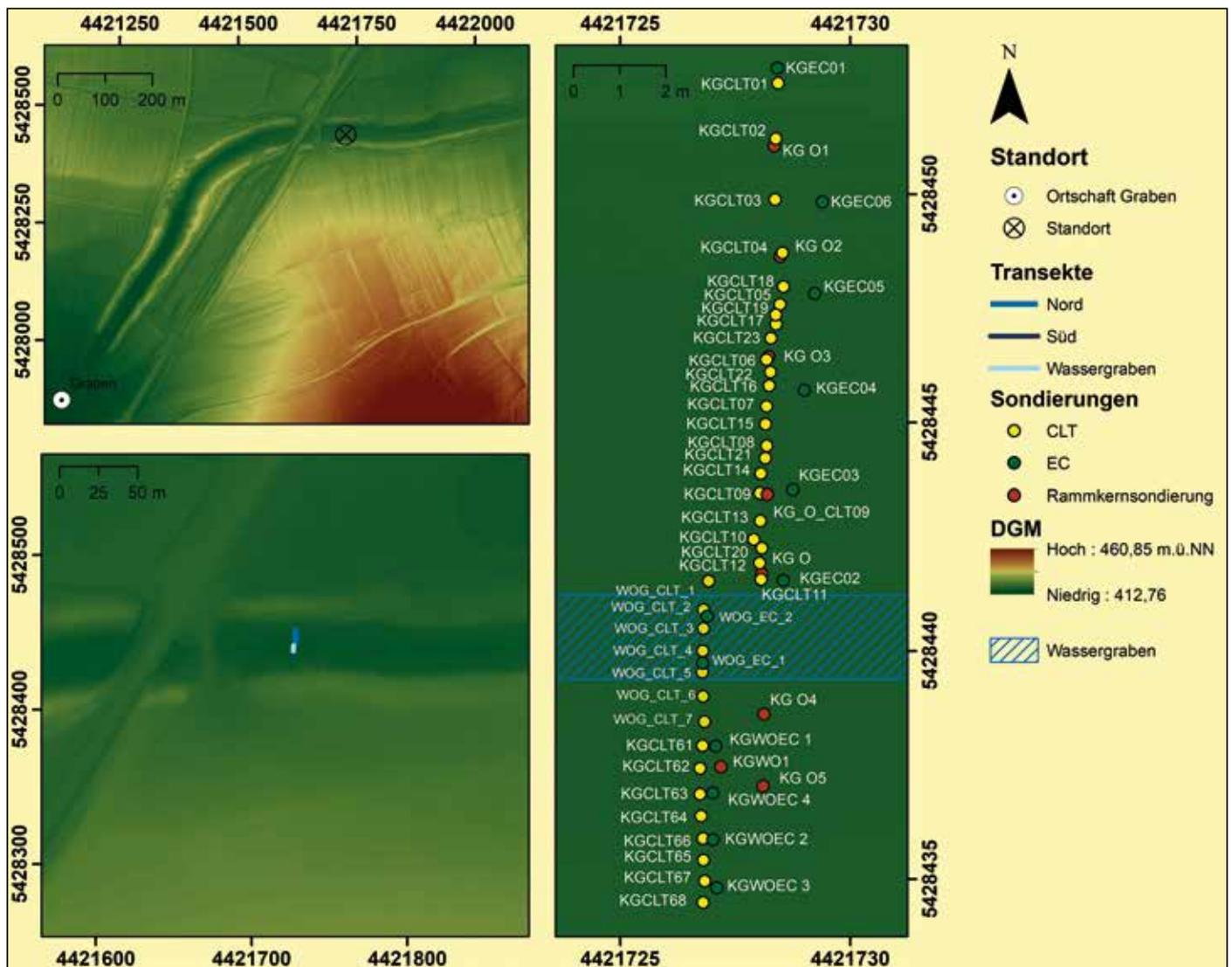


Abb. 3 Überblick über die Sondierungen mittels *Direct-push* im West-Ost-Bereich des Karlsgrabens. – (Graphik J. Völlmer; Datengrundlage LIDAR/Bayerische Vermessungsverwaltung, Raumbezug: WGS84, GK4).

Die hochauflösenden Messungen finden *in situ* statt, wobei die Daten vor Ort erstausgewertet werden, was eine schnelle Anpassung der Beprobungsstrategien ermöglicht. Es ist eine hohe Anzahl an Sondierungen in relativ kurzer Zeit realisierbar (ca. 20-80 Sondiermeter/Tag, je nach Methode). Eine Kombination der *In-situ Direct-push*-Daten mit Rammkernsondierungen bzw. den daraus gewonnenen laboranalytischen Daten kann durchgeführt werden, um die *Direct-push*-Daten zu verifizieren (EPA 1997; Leven u. a. 2011; Hausmann u. a. 2016; 2018).

Die ursprünglich für die Altlasten- und Baugrunderkundung entwickelten Systeme finden aufgrund flexibler Anwendungen und guter Kombinierbarkeit verstärkt auch Anwendung in der Geoarchäologie (Dalan u. a. 2011; Fischer u. a. 2016; Koster 2016; Hausmann u. a. 2018). In der vorliegenden Untersuchung wurden eine Sonde zur Farbmessung (*Color Logging Tool* [CLT]) und eine Leitfähigkeitssonde (*Electrical Conductivity* [EC]) eingesetzt.

Für die Studie wurde der West-Ost-Bereich des Karlsgrabens gewählt, bei dem der Grundwasserflurabstand ca. 20 cm beträgt, was die Durchführung einer Grabung in hohem Maße erschwert hätte. Weiterhin konnte mit Rammkernsondierung (Zielhofer u. a. 2014) aufgrund von Kompressionseffekten der organikreichen Sedimente keine ausreichende Tiefengenaugigkeit erzielt werden. Das zu untersuchende *Direct-push*-Transekt (**Abb. 3**) wurde initial 2014 (Hausmann u. a. 2018) angelegt und in den Jahren 2016 und 2017 sukzessive durch unsere Arbeitsgruppe erweitert. Die Durchführung der *Direct-push*-Sondierungen erfolgte mittels einer mobilen Sondierdraupe (Geoprobe 6610DT) in Abständen von 12,5 bis 150 cm. Ausgegeben werden die Leitfähigkeitsdaten mit einer Auflösung von 3-4 cm und die Messwerte der Farbsonde mit 1-2 cm bei einer Tiefe von bis zu 10 m.

Die Farbsonde

Die Farbsonde (*Soil Color Optical Screening Tool, SCOST™*, Dakota Technologies, Fargo, USA) ähnelt in ihrer Funktionsweise einer Digitalkamera. Für die Messung wird weißes Licht vom Steuergerät über ein Glasfaserkabel in die Sonde übertragen und durch ein Saphirglasfenster an der Seite der Sonde auf das Sediment gelenkt. Die Reflektion des Lichts wird anschließend über eine weitere Glasfaser zurück zum Steuergerät übertragen, wo es über einen Detektorchip gemessen wird (Wellenlängenbereich: 350-1000 nm). Während des Vortriebs (ca. 2 cm/s) wird im Zeitintervall von ca. 300 ms (variabel) ein Farbwert interpoliert und die Tiefe zentimetergenau über ein Potentiometer aufgezeichnet. Somit kann über die Sondiergeschwindigkeit die Auflösung (Werte/cm) gesteuert werden. Ein Anhaften und Verschleppen von Material an der Sonde wird durch die hohe Reibung der Sonde im Sediment verhindert. Um die Vergleichbarkeit der Farbmessungen zu gewährleisten, wird vor den Messungen ein standardisierter Weißabgleich durchgeführt. Die Ausgabe der Daten erfolgt für die Vorortauswertung als RGB-Vorschau bild und für die spätere Datenverarbeitung numerisch. Die Daten werden durch die Software (OST, Dakota Technologies, Fargo, USA) in den Farbsystemen Munsell, RGB und CIE XYZ (Tristimuli) bereitgestellt. In der numerischen Verarbeitung ist eine Umrechnung der Farbdaten in andere Farbsysteme für weitere Analysen möglich (Barrett 2002; Dalan u. a. 2011; Hausmann u. a. 2016). Die aufgenommenen Daten können dazu verwendet werden, Schichten tiefengenau und hochaufgelöst anhand ihrer Farbunterschiede zu identifizieren und ihre Eigenschaften, z. B. organische, reduzierte und oxidierte Horizonte und Verfüllungen etc., zu beschreiben (Cornell/Schwertmann 2003; Blume u. a. 2010, 265-266; Hartemink/Minasny 2014; Hausmann u. a. 2016). Besonders die Anwendung mehrerer Farbsondierungen im Bereich eines Transekts erlaubt die Rekonstruktion des horizontalen Schichtaufbaus (Hartemink/Minasny 2014; Hausmann u. a. 2016; 2018).

Die Leitfähigkeitssonde

Die Leitfähigkeitssonde (SC-500, Keijr Engineering Inc., Geoprobe Systems, USA) misst den spezifischen elektrischen Widerstand des Sediments vertikal entlang des Sondierkanals über ein Integral von 10 cm und gibt den Wert invers als elektrische Leitfähigkeit in mS/m wieder. Die Widerstandsmessung erfolgt mit vier in gleichmäßigem Abstand in der Sonde verbauten Elektroden in einer Wenner- α -Anordnung (Christy/Christy/Wittig 1994; Schulmeister u. a. 2003a). Auf diese Weise können Korngrößenzusammensetzungen relativ voneinander unterschieden werden, wobei tonige Sedimente in der Regel hohe und sandige Sedimente vergleichsweise niedrige Werte aufweisen (Butler u. a. 1999; Schulmeister u. a. 2003a). Die Ergebnisse hängen jedoch nicht ausschließlich von der Korngröße ab, sondern werden generell durch Porenraum,

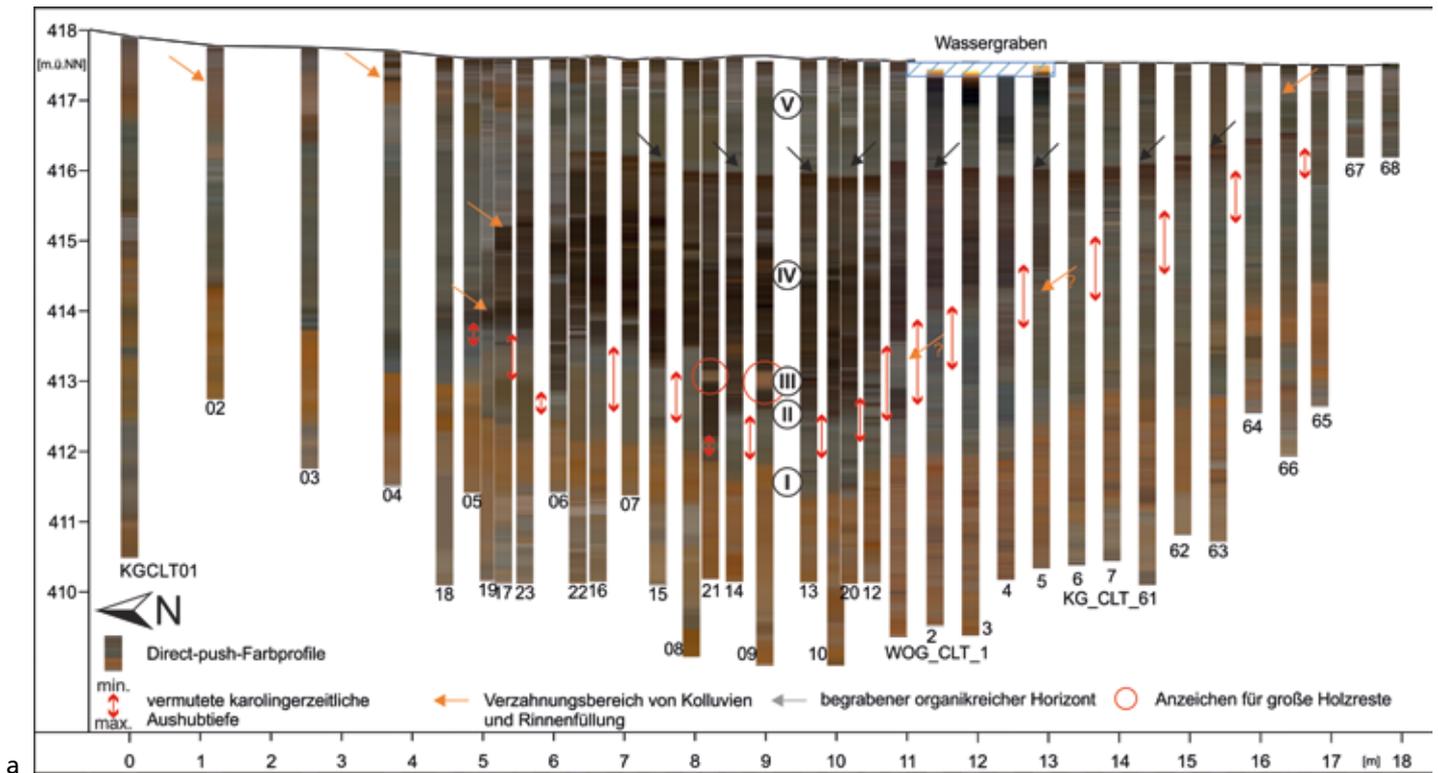


Abb. 4 Transekt durch den West-Ost-Bereich des Karlsgrabens: **a** Durch die hochauflösenden Messungen der Farbsonde können die verschiedenen Sedimente und die Geometrie des Grabens tiefengenau bestimmt werden. Im unteren Teil sind die rötlichen Farben des oxidierten sandig-tonigen Untergrunds zu erkennen. Darüber und an den Rändern befindet sich feineres reduziertes (graues) Sediment. Im Zentrum zeichnet sich eine mächtige organische Grabenfüllung ab. An den Rändern treten kolluviale Verlagerungen aus Richtung der Aushubwälle auf (Hausmann u. a. 2018 und eigene Daten). – **b** Dargestellt sind die Daten der Leitfähigkeitssonde, die verschiedene Schichten und Fazies durch ähnliche Kurvenverläufe aufzeigen. Eingezeichnet sind sichtbare bauwerks- und sedimentationsbedingte bzw. quasinatürliche Strukturen (Hausmann u. a. 2018 und eigene Daten). – **c** Sedimentansprachen aus Rammkernsondierungen. Im Gelände wurden Bodenart, Redoxverhältnisse, Faziestypen und organische Bestandteile angesprochen bzw. abgeschätzt. Lücken in den Sondierungen sind durch n/a gekennzeichnet. – (Graphik J. Völlmer; a überarbeitet nach Hausmann u. a. 2018, 10 Abb. 8c und eigenen Daten; b überarbeitet nach Hausmann u. a. 2018, 10 Abb. 8b und eigener Daten; c überarbeitet nach Zielhofer u. a. 2014; Hausmann u. a. 2018, 10 Abb. 8a und eigener Daten).

Sättigung sowie Chemismus und Salinität des Porenfluids beeinflusst. Aufgrund der Elektrodenanordnung an der Sonde können Schichten ab einer Mächtigkeit von ca. 5 cm detektiert werden. Die Datenreihen bilden einen relativen Parameter, der im vertikalen Profil Schichten bzw. Schichtgrenzen aufzeigt (Butler u. a. 1999; Schulmeister u. a. 2003b; Weidelt 2005, 90; Lange 2005, 128-129). Zur Ergänzung, Präzisierung und Validierung der *Direct-push*-Dateninterpretation wurden Rammkernsondierungen ausgewertet und laboranalytische Ergebnisse in den Ansatz mit aufgenommen (vgl. Matney u. a. 2014; Hausmann u. a. 2018).

ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

Aus 37 *Direct-push*-Farbsondierungen, zwölf *Direct-push*-Leitfähigkeitsaufnahmen und acht Rammkernsondierungen wurde ein zweidimensionaler Schnitt durch den Graben erstellt. Die **Abbildungen 4a-c** zeigen die Ergebnisse, welche die Grundlage für die stratigraphische Rekonstruktion der Grabenfüllungen darstellen.

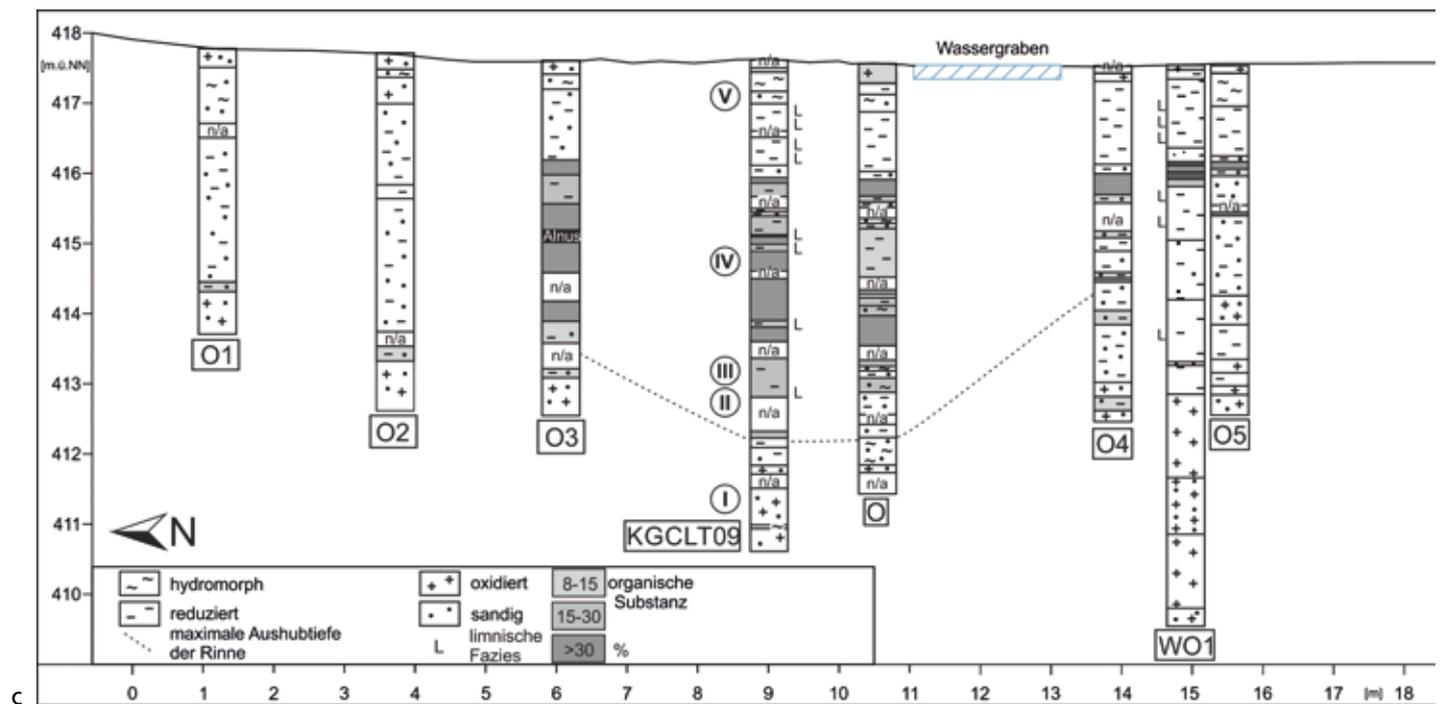
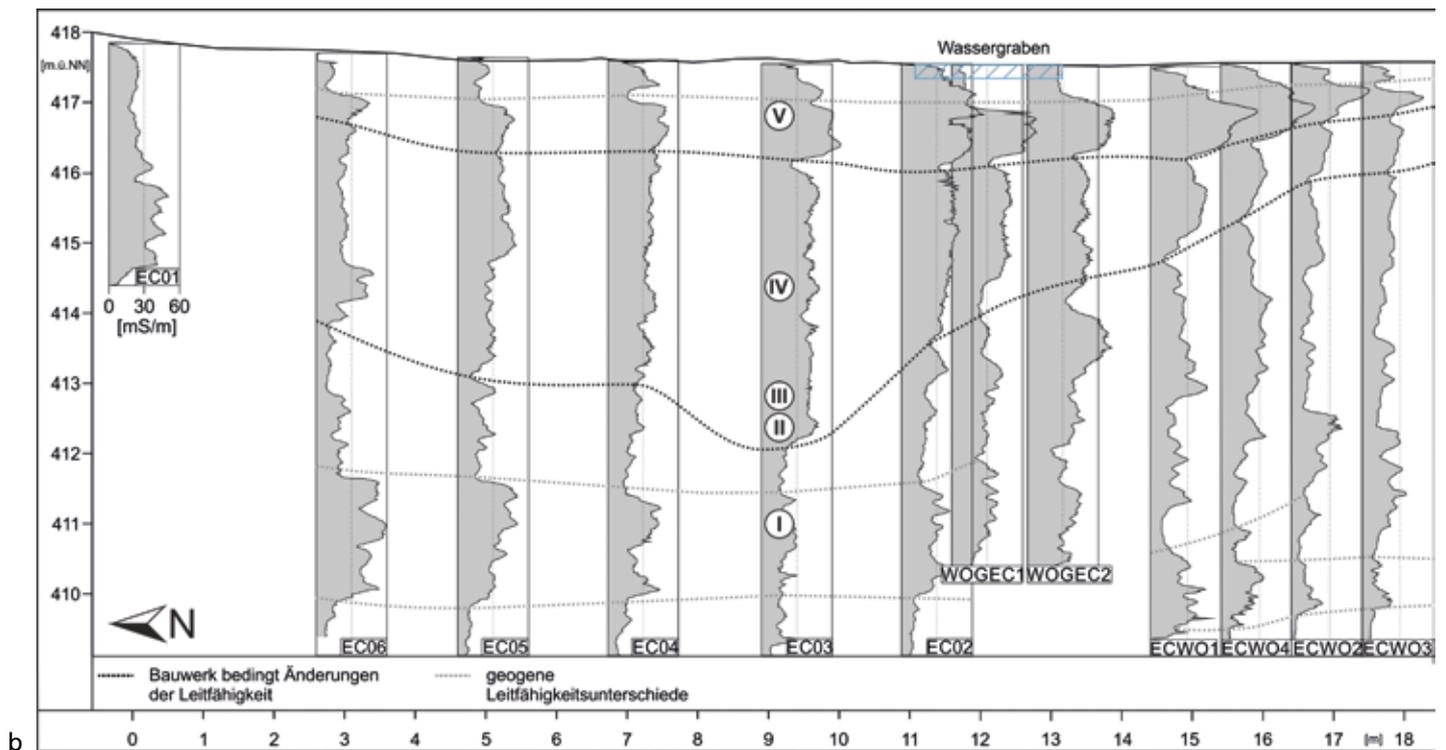


Abb. 4 Fortsetzung.

Direct-push-Farbsondierungen

Die vertikal hochauflösenden Farbsondierungen (Abb. 4a) bringen verschiedene anthropogene und natürliche Strukturen im Untergrund zum Vorschein. Der tiefere, horizontal gelagerte Untergrund ist durch eine graue Schicht an der Basis des Schnitts charakterisiert. Im Bereich der Sondierungen KG_CLT_08 bis 12

befindet sich eine rötliche Fazies, welche die graue Schicht unterbricht. Darüber folgen im gesamten Transekt rötliche Schichten. Im zentralen Bereich befindet sich darüber eine zweigliedrige, dunkelbraune bis schwarze Verfüllung mit einer Mächtigkeit von ca. 2 m. Besonders auffällig ist hier im unteren Bereich eine rinnenartige Struktur (Basis 412,5 m ü. NN) mit einer Breite von ca. 2,5 m und einer Mächtigkeit von ca. 1 m. Auf dem Niveau von 413,5 m ü. NN erweitert sich die dunkle Verfüllung um ca. 3 m lateral in nördliche Richtung. Im südlichen Bereich des Transekts ist die seitliche Ausweitung weniger stark ausgeprägt. An die dunkelbraune bis schwarze Verfüllung schließt sich stratigraphisch eine grau-grüne Sedimentfolge zwischen ca. 414,5 und 416 m ü. NN an. Weitere Besonderheiten bilden Verzahnungen innerhalb der Grabenfüllung. Im Norden greift ab der Höhe von 415 m ü. NN ein hellgrauer Keil in die dunkle Struktur in der Mitte. Eine weitere Einschaltung stellt ein keilförmiger hellgrauer Bereich nahe der Oberfläche dar. Ebenso findet sich im Süden nahe der Oberfläche eine hellgraue Verzahnung.

Die sondierten Sedimentfarben können in verschiedene Einheiten eingeteilt werden und weisen auf natürliche und anthropogene Prozesse hin. Der geogene Untergrund (I) ist durch wechselhafte Redoxverhältnisse gekennzeichnet. Sowohl die unterste graue als auch die darüber folgende rötliche Schicht können diesem zugeordnet werden. Letztere unterliegt jedoch im oberen Bereich indirekt dem Einfluss des Baus des Karlsgrabens. Dies betrifft die Redoxverhältnisse, die durch die Anlage des Kanals und den damit einhergehenden Einfluss von Sauerstoff und Wasser verändert wurden. Die trogförmige Unterbrechung der grauen Schicht im zentralen unteren Bereich des Schnitts weist darauf hin.

In der darüber liegenden grauen Schicht erfolgte der Aushub des Kanals im Frühmittelalter. Die Färbung weist auf reduzierende Verhältnisse und einen wassergesättigten Zustand hin. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Aushub bis mindestens an die Unterkante der darüber liegenden dunkelbraunen bis schwarzen Schicht erfolgte (**Abb. 4a**, rote Pfeile). Die Aushubtiefe beläuft sich innerhalb der Rinne auf ein Niveau von mind. 412,5 m ü. NN. Deutliche Folgen des Baus stellen keilförmige kolluviale Verfüllungen (II? + III) an den Aushubrändern (**Abb. 4a**, orange Pfeile) dar.

Die dunkelbraunen bis schwarzen Sedimente (IV) repräsentieren die karolingischen bis hochmittelalterlichen Grabenfüllungen. Bei diesen handelt es sich um organikreiche Ablagerungen, die durch offene Stehgewässer oder unter semiterrestrischen Bedingungen entstanden sind. Die scharfe seitliche Abgrenzung der zentralen Rinne weist wahrscheinlich auf eine Stabilisierung z. B. mit Bauhölzern hin. Innerhalb der Farbsondierungen können Hölzer ebenso wie Bruchtorfe durch helle Farben angezeigt werden (**Abb. 4a**, rote Kreise).

Die dunkelbraunen bis schwarzen Sedimente (IV) können in zwei Schichten untergliedert werden. Die etwas hellere Färbung der oberen Schicht lässt möglicherweise auf einen leicht höheren Anteil an klastischen Sedimenten schließen.

Oberhalb eines deutlich erkennbaren organikreichen Bodenhorizonts (**Abb. 4a**, schwarze Pfeile), der die organischen Grabenfüllungen abschließt, beginnt die jüngste Sedimentationsphase (V). Das graue Sediment beschreibt wiederum reduzierende und somit wassergesättigte Verhältnisse. Aufgrund des Rückgangs organischen Materials erfolgte die Sedimentation vermutlich relativ schnell.

Direct-push-Leitfähigkeitssondierungen

Ergänzend zu den Farbsondierungen lieferten die Leitfähigkeitssondierungen (**Abb. 4b**) Interpretationsansätze zur Korngrößendifferenzierung innerhalb des sondierten Transekts. In der untersten Sedimentsequenz (I) finden sich heterogene Werte zwischen 10 und 40 mS/m. Die Kurvenverläufe der Leitfähigkeitswerte ähneln sich im nördlichen Teil und weisen auf eine einheitliche Schichtfolge hin. Richtung Süden wird

diese Schichtfolge deutlich mächtiger. Die Werte nehmen im südlichen Bereich teils höhere und heterogenere Verteilungen an. Der Übergang zur darüber liegenden Schicht ist durch eine deutliche und abrupte Abnahme der Leitfähigkeitswerte gekennzeichnet. Im Süden sind die Werte wiederum deutlich heterogener. In der folgenden Sequenz (II-IV) wurden im Zentrum relativ konstante Werte im Bereich von ca. 50 mS/m gemessen. Der Bereich wird durch niedrige Werte eingegrenzt.

Abschließend folgt nahe der Oberfläche (V) eine heterogene Fazies. Hier werden Minima dicht unter der Oberfläche sichtbar. Darunter erreichen die Messungen maximale Werte von ca. 70 bis 100 mS/m.

Aus den Leitfähigkeitsdaten (Lf) kann der sedimentologische Aufbau des Grabens und der umliegenden Ablagerungen rekonstruiert werden. Der geogene Untergrund (I) ist horizontal gelagert und besteht aus einer Wechsellagerung von sandigen (Lf-Minima) und tonigeren Sedimenten (Lf-Maxima). Sandige Lagen finden sich beispielsweise an der Basis des Profils sowie am Übergang zum nächsten Abschnitt.

Der Übergang (oberer Bereich der Lage I) zur Grabenverfüllung zeichnet sich durch niedrige Lf-Werte aus. Bei diesem Sediment handelt es sich wahrscheinlich um geogenes, sandiges Material. Ob dieses Material umgelagert wurde oder beim Bau verrutscht ist, kann nicht eindeutig geklärt werden.

Die organikreiche Verfüllung des Karlsgrabens (III-IV) zeichnet sich durch gleichmäßige Lf-Werte aus, die auf einen homogenen Sedimenttypus schließen lassen.

Der Anstieg der Lf-Werte in der abschließenden Sedimentlage (V) zeigt eine deutlich feinere Matrix an. Auch in dieser Sequenz können somit intern verschiedene Schichten ausgewiesen werden. Eine sandige Einschaltung ist in der mittleren Sequenz der Lage V durch geringere Lf-Werte zu erkennen.

Rammkernsondierungen

Ergänzend zu den *In-situ Direct-push*-Daten wurden mehrere Rammkernsondierungen im Bereich des *Direct-push*-Schnitts durchgeführt (**Abb. 4c**). Verschiedene fluviale und limnische Fazies wurden durch die Ansprache der Korngrößen, der Organikgehalte, der Redoxmerkmale und der daraus resultierenden Schicht- und Horizontabfolge identifiziert. In der ältesten Sequenz (I) unterhalb der organischen Füllung werden teils oxidierte, teils reduzierte sandig-tonige Sedimente vorgefunden. Hierbei handelt es sich um das geogene Ausgangsmaterial fluvialen Ursprungs. Die Aushubphase (II) ist gekennzeichnet durch umgelagertes Material mit ersten organischen Resten. Innerhalb der organikreichen Grabenfüllung (Sedimentlage III, IV) wurden mächtige Torflagen und vereinzelt Faulschlämme erkundet. Oberhalb (Lage V) und innerhalb der organikreichen Grabenfüllungen befinden sich feinkörnige und reduzierte Sedimente einer Stillwasserfazies. Die Ränder des Transekts weisen kolluviale Durchmischungen von sandig-tonigem sowie oxidiertem und reduziertem Material auf.

DISKUSSION

Ausbauzustand und Verfüllung des Karlsgrabens

Innerhalb des Grabens konnten verschiedene Schichten (**Abb. 4a-c; Tab. 1**) ausdifferenziert werden, die auf unterschiedliche Ablagerungsbedingungen und Prozesse zurückzuführen sind, die schematisch in **Abbildung 5** zu sehen sind. Einen großen Einfluss bei der Verfüllung hatten Sedimentverlagerungen während und nach der Bauzeit (III, IV, V), was an den Rändern durch Verzahnungen mit dem erodierten Aushub- bzw. Wallmaterial deutlich wird. Der erodierte Aushub kann mit der in den Schriftquellen beschriebenen (Hack

Phasen	Eigenschaften			Interpretation	Zeitspanne	Zeitmarker (aus Zielhofer u. a. 2014; Werther u. a. 2015)
	Farbe	Leitfähigkeit (in mS/m)	überwiegende Fazies			
V	grau	70-100	limnische und umgelagerte Sedimente	Verlandung	seit Spätmittelalter	19.-20. Jh. (Funde) 1631 ± (Dendrochronologie) 1523-1619 (¹⁴ C, cal) 16.-17. Jh. (Hufeisen) 15.-16. Jh. (Keramik)
IV	braun-schwarz	ca. 50	limnische Sedimente	Weiher	karolingerzeitlich bis Hochmittelalter	1266-1286 (¹⁴ C, cal) 1022-1153 (¹⁴ C, cal) 1043-1206 (¹⁴ C, cal)
III	grau	ca. 50	limnische Sedimente	Weiher	karolingerzeitlich	990-1020 (¹⁴ C, cal) 819-933 (¹⁴ C, cal) 903-971 (¹⁴ C, cal) 792-870 (¹⁴ C, cal)
II	grau	ca. 50	limnische und umgelagerte Sedimente	maximale Aushubtiefe und erste Verfüllungen	karolingerzeitlich	793 (Dendrochronologie, Schriftquellen) 716-836 (¹⁴ C, cal) 689-761 (¹⁴ C, cal) 666-708 (¹⁴ C, cal)
I	grau-rötlich	10-40	fluvial	geogener Untergrund	präkarolingisch	

Tab. 1 Sedimentationsphasen aus den **Abb. 4a-b** anhand der *In-situ Direct-push*- und Rammkernsondierungen und ergänzenden archäologischen Daten.

2014) und aus archäologischen Grabungen dokumentierten (Werther u. a. 2015) Rutschungsanfälligkeit des Aushubmaterials während der Bauphase in Zusammenhang stehen. Die Farbmessungen lieferten hierzu Hinweise in Form von keilförmigen Einschüben vom Rand (**Abb. 4a**, orange Pfeile).

Die maximale Aushubtiefe wurde im Bereich zwischen 412 und 412,5 m ü. NN (**Abb. 4a**, rote Pfeile) verortet. Die Tiefe der organischen Lage kann durch die Farbmessungen eindeutig identifiziert werden. Die organischen Lagen belegen eine Mindestaushubtiefe von 412,5 m ü. NN. Da jedoch vor der Bildung der organischen Grabenverfüllung basale kolluviale Ablagerungen durch Rückführung des Aushubmaterials entstanden sind (Zielhofer u. a. 2014; Werther u. a. 2015; Hausmann u. a. 2018), ist eine Festlegung auf die Tiefe von 412,5 m ü. NN zwangsläufig nicht exakt. Die tatsächliche Aushubtiefe ist nach den Befunden aus den Rammkernsondierungen vermutlich 50-70 cm tiefer anzusetzen, was durch das Auffinden von ersten organischen Resten deutlich wird. Die Leitfähigkeitswerte zeigen in diesen basalen kolluvialen Ablagerungen ein Minimum, was auf eine sandige Fazies schließen lässt. Wären die basalen Ablagerungen durch Rutschungen bei den Bauarbeiten entstanden, so ist aufgrund der Leitfähigkeitswerte eine maximale Aushubtiefe von ca. 412 m ü. NN anzunehmen. Die sandige Schicht kann in Richtung Süden horizontal verfolgt werden, was ebenfalls auf eine geogene Sedimentation schließen lässt.

Frühere Interpretationen der *Direct-push*-Daten in diesem Bereich (nördliches Teiltransekt: Hausmann u. a. 2018), welche die Aushubtiefe am Übergang von rötlichen zu grauen Farben (411,5 m ü. NN) sahen, müssen somit einer alternativen These gegenübergestellt werden. Der Übergang zwischen dem rötlichen und grauen Sedimentbereich weist demnach eher auf eine Veränderung der Redoxverhältnisse (I zu II) hin als auf einen tieferen Grabenaushub.

Die dunkelbraune bis schwarze organische Grabenfüllung (III, IV) ist auf semiterrestrische und teils limnische Sedimentation zurückzuführen. In den Rammkernsondierungen wurden entsprechend Bruchtorfe, Niedermoortorfe und Faulschlämme (Ad-hoc-AG Boden 2006; Blume u. a. 2010, 52-53. 342-343) angesprochen.

Durch die Anwendung der *Direct-push*-Sondierungen wurde die Ausdehnung der organischen Grabenfüllung genau bestimmt. Dabei hatte die zentrale organisch verfüllte Rinne eine Breite von ca. 2,5 m und eine Tiefe von 1 m. Falls es sich um die Fahrrinne in ihrem finalen Bauzustand handelt, hätte dies ein Passieren von größeren karolingischen Booten in eine Richtung erlaubt (Hoffmann/Ellmers 1990/1991; Bockius 2014; Zielhofer u. a. 2014). Demgegenüber stehen Ergebnisse, die an Standorten mit einer geringeren notwendigen Aushubtiefe eine Kanalbreite von 5-6 m ergaben (Zielhofer u. a. 2014; Werther u. a. 2015).

Somit müssen verschiedene Modelle vorgestellt und Indizien (**Abb. 4a**) für eine schmalere oder vergleichbar breite Rinne diskutiert werden. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Trennung von *in situ* befindlichen spätpleistozänen Talfüllungen und erodiertem Aushubmaterial aus eben diesen Talfüllungen:

Im Norden des Transekts befindet sich im Bereich der Sondierung KG_CLT_06 ein deutlicher Höhenversatz der organischen Verfüllung von ca. 80 cm, die somit wesentlich tiefer reicht als in den nördlich und südlich angrenzenden Sondierungen. Wenn dieser tiefer liegende Abschnitt den nördlichen Rand der Baugrube markiert, ergibt sich eine ursprüngliche Breite der Baugrube von insgesamt 5-6 m. Für die unmittelbar angrenzende graue Fazies gibt es in diesem Fall zwei Möglichkeiten: Entweder handelt es sich um kolluvial verlagertes Aushubmaterial, oder die Rinne wurde in diesem Bereich nicht fertiggestellt und die Sondierung KG_CLT_06 hat eine gräbchenartige Vertiefung am Rand der Baugrube erfasst.

Auf der südlichen Seite der zentralen Fahrrinne befinden sich in der Sondierung WOG_CLT_01 organische Verfüllungen (**Abb. 4a**, bei 412,50 m ü. NN), die von grauen Sedimenten überlagert sind. Gegebenenfalls zeigt sich auch hier ein Indiz dafür, dass die zentrale Fahrrinne ursprünglich breiter angelegt war.

Gegen eine Sohlbreite der zentralen Rinne von 5-6 m spricht allerdings die scharfe laterale Abgrenzung der organischen Rinnenfüllung (**Abb. 4a**, Sondierung KG_CLT_21) zum angrenzenden nördlichen grauen Sediment (**Abb. 4a**, Sondierung KG_CLT_08), die eine hölzerne Böschungssicherung zwingend voraussetzt, wie sie in anderen Bereichen gefunden wurde (Werther u. a. 2015). Wenn es sich nicht um ein Provisorium aus der Bauzeit handelt, sondern um einen finalen Verbau, würde dies bedeuten, dass der tiefste Teil der Baugrube und damit auch die Fahrrinne in diesem Bereich nicht breiter als 2,5-3 m waren.

Hinweise auf stratigraphisch jüngere Rückführungen von Böschungs- und Aushubmaterial zeigen sich durch dünne Lagen mit erhöhtem Organikanteil in den Rammkernbohrungen O4 (**Abb. 4c**, bei ca. 414,50 m ü. NN) und O5 (**Abb. 4c**, bei ca. 415,40 m ü. NN), etwa auf Höhe der Sondierung WOG_CLT_01 (**Abb. 4a**) im südlichen Böschungsbereich der Baugrube. Diese Lagen lassen erkennen, dass es sich bei den darüber liegenden Schichten um verlagertes Aushubmaterial handelt. Orange Pfeile in **Abbildung 4a** zeigen auffällige Positionen der Verzahnung von organischen Grabenfüllungen und erodiertem Aushubmaterial.

Damit muss festgehalten werden, dass die organische Verfüllung im Zentralbereich zwar die maximale laterale Ausdehnung einer potenziell intakten Fahrrinne markiert, im Böschungsbereich allerdings nur eine Minimalausdehnung des ehemaligen Bauwerks nachzeichnet. Erst die Berücksichtigung möglicher kolluvialer Massenverlagerungen im Böschungsverlauf und ergänzende Befunde aus Rammkernbohrungen ermöglichen dort eine Erfassung der maximalen Dimensionen der Baugrube. Die *Direct-push*-Daten in Verbindung mit Rammkernsondierungen liefern damit für den Standort präzise Modelle für die Geometrie der Baugrube, die deutlich über den bisherigen Kenntnisstand hinausgehen.

***In-situ Direct-push*-Sondierungen versus Rammkernsondierungen**

Vorteilhaft bei Rammkernsondierungen sind die umfassende und genaue Ansprache der Sedimente sowie die Möglichkeit der Probennahme bzw. daraus folgende Analysen im Labor. Hierbei kann eine gute vertikale

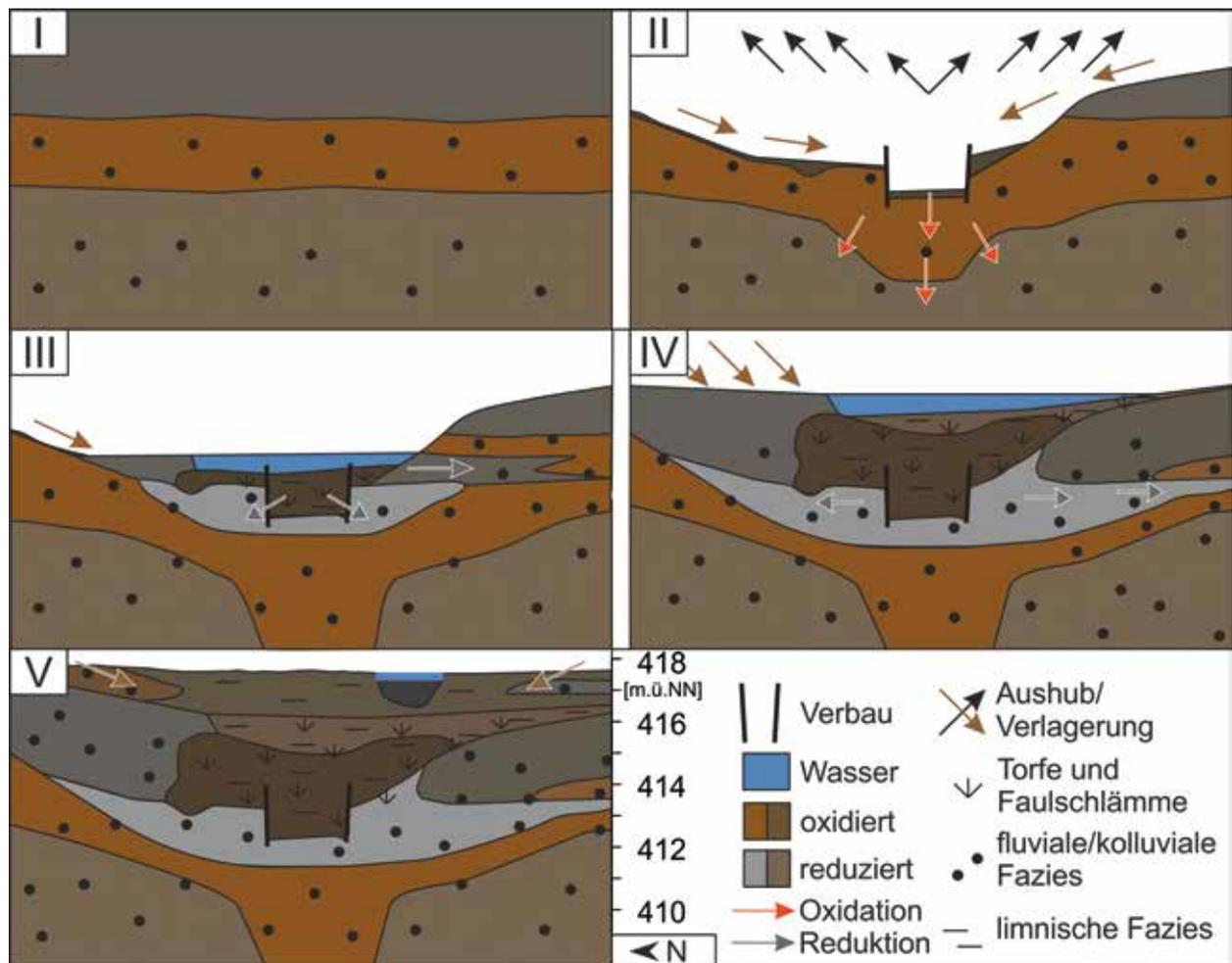


Abb. 5 Schematischer Ablauf des Baus und der sukzessiven Verfüllung des West-Ost-Bereichs: **I** ungestörter, präkarolingischer Untergrund. – **II** Aushubphase mit veränderten Redoxverhältnissen im Bereich der Rinne und organischen Einträgen durch die Bauaktivität. – **III** Weiher mit fortschreitender Veränderung der Redoxverhältnisse und einsetzendem Torfwachstum. – **IV** Weiher und weiteres Torfwachstum. – **V** jüngste Verlandung. – (Graphik J. Völlmer mit Informationen aus Zielhofer u. a. 2014; Werther u. a. 2015).

Auflösung erreicht werden. Allerdings sind engmaschige Rammkernsondierungen mit einem hohen Arbeits- und Zeitaufwand verbunden (ca. 15-25 Sondiermeter/Tag) und die Tiefenangaben sind aufgrund von Sedimentverschleppungen in der Bohrkammer sowie Kompressionseffekten nicht genau (Leitholdt u. a. 2012; Leitholdt/Krüger/Zielhofer 2014; Hausmann u. a. 2018). Für die Zusammenstellung von Transekten mit hoher lateraler Auflösung bieten *In-situ Direct-push*-Sondierungen deutliche Vorteile durch höhere Tiefengenauigkeit, methodische Breite, Geschwindigkeit und Kosteneffizienz (20-80 Sondiermeter/Tag, je nach Methode). In den vorgestellten Untersuchungen wurden zwei Sondentypen (Farbe und Leitfähigkeit) für die Erfassung eines Querschnitts verwendet. Es besteht jedoch die Möglichkeit des Einsatzes weiterer Sonden (Leven u. a. 2011; Zschornack/Leven-Pfister 2012). Beispielsweise bietet sich der Einsatz von Drucksonden zur Erfassung der Festigkeit des Untergrundes und Abschätzung der Korngrößenverteilung der Sedimente an (Robertson 1990; Lunne/Robertson/Powell 1997; Prinz/Strauß 2011, 170; Vienken/Leven/Dietrich 2012).

Das Potenzial der *Direct-push*-Methoden in der (Geo-)Archäologie

Minimalinvasive geophysikalische Erkundungsmethoden spielen in der (Geo-)Archäologie bei der Untersuchung von Bodendenkmälern zunehmend eine Rolle. Sie dienen insbesondere zur Lokalisierung der Bodendenkmäler und zur näheren Erfassung ihrer Strukturen (z. B. Bates/Bates 2000; Grasmueck/Weger/Horstmeyer 2004; Papadopoulos u. a. 2006; Dalan u. a. 2011; Fischer u. a. 2016). Ziel ist es, wichtige Informationen zur Tiefe, Erhaltung und Ausdehnung z. B. bei der Planung von Baumaßnahmen oder auch bei der Flächenausweisung von Bodendenkmälern (z. B. Welterbe Pfahlbauten) zu gewinnen.

Die *Direct-push*-Sondierung steht allgemein für ein methodisch umfangreiches, minimalinvasives *In situ*-Messverfahren, das nichtinvasive Erkundungstechniken (Döberl/Müller/Dörrie 2012) sowie geringinvasive Rammkernsondierungen ergänzt. Im Gegensatz zur elektrischen Widerstandstomographie, zur Magnetik, zu seismischen Erkundungstechniken oder auch zum Bodenradar liefert die *Direct-push*-Sondierung allerdings hochauflösende Daten in einer exakten Tiefengenauigkeit.

Direct-push-Messungen können zur Validierung von nicht- und minimalinvasiven Erkundungstechniken herangezogen werden. Hierdurch entstehen Synergieeffekte und potenziell auch mehrdimensionale Modellierungsansätze (Bates/Bates 2000; Hausmann u. a. 2013; Fischer u. a. 2016; Hausmann u. a. 2018). Insbesondere in der Feuchtbodenarchäologie, bei der Grabungen nur erschwert oder auch unmöglich sind, bietet die *Direct-push*-Sondierung einen alternativen, zeit- und kosteneffizienten Ansatz.

Weiterhin erlauben *Direct-push*-Sondierungen die Analyse eines Bodendenkmals auf verschiedenen räumlichen Skalenebenen. Bauwerke und Strukturen mit mehreren Hundert Metern Ausdehnung, wie z. B. der vorgestellte Karlsgraben, können in relativ kurzer Zeit an verschiedenen Stellen untersucht werden, um großskalige Erkenntnisse zu gewinnen. Die Reduzierung der Sondierabstände erlaubt die Detailuntersuchung in ausgewählten Transekten wichtiger Bereiche.

Generell ist der Informationsgehalt, z. B. der *Direct-push*-Farbsonde, nur bedingt vergleichbar mit der umfassenden Untersuchung des Bodendenkmals durch eine detailreiche archäologische Grabung. Dennoch können durch eine zielgerichtete und flexible Kombination von Methoden (*In-situ Direct-push*, Labor etc.) verschiedene Fragestellungen zum Aufbau und der Verfüllung geklärt werden, wie diese Studie belegt. Somit ergeben sich neue Möglichkeiten für bis dato nicht erkundete Standorte.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Über *In-situ Direct-push*-Sondierungen wurde am Karlsgraben ein hochaufgelöstes Transekt durch die Grabensohle in einem Bereich erstellt, in dem Ausgrabungen nicht mit vertretbarem Aufwand durchführbar sind. Das minimalinvasive Verfahren bietet insbesondere in der Feuchtbodenarchäologie eine mögliche Alternative zur logistisch aufwendigen archäologischen Grabung. Die kontinuierliche Sondierung der Sedimentfarben im Bereich des Bodendenkmals ergab eine hochpräzise Rekonstruktion des Bauwerkquerschnitts inklusive der Verfüllungen. Über den Einsatz der Leitfähigkeitssonde wurden zusätzliche Informationen zur Textur gewonnen. Ergänzende Rammkernsondierungen unterstützten und validierten die Interpretation.

Es lassen sich verschiedene Verfüllungsstadien rekonstruieren: An der Basis des Transekts befinden sich rötliche, horizontal gelagerte, fluviale (teils tonige) Sande (I). In dieser Sequenz wurde die maximale Aushubtiefe erreicht. Darüber folgen initiale Verfüllungen (II) aus der Bauzeit mit sandigem Material. Torf- und Faulschlammablagerungen weisen auf Weiher (III, IV) während des Früh- bis Hochmittelalters hin. Deutlich werden besonders die verfüllte Rinne, die kolluvialen Einträge von den Rändern sowie Strukturen durch

Redoxveränderungen. In der Verlandungsphase (V) haben sich reduzierte, feinkörnige, limnische Sedimente während des Spätmittelalters bis zur rezenten Grünlandnutzung abgelagert. Einträge von den Aushubwällen weisen auf die Instabilität des Bauwerks bis heute hin.

Die Untersuchungen zeigen einen breiten Aushub bis 413,5 m ü. NN (4 m Tiefe) und eine mind. 2,5 m breite zentrale Rinne mit einer Sohle bei ca. 412,5 m ü. NN. Anzeichen für einen Holzverbau an den Rändern sind in den Farbsondierungen nicht direkt erkennbar, wohl aber machen abrupte laterale Farbwechsel und die vertikale Schichtgrenze einen Holzverbau wahrscheinlich. Verschiedene Hinweise deuten eine breitere Rinne (3-6 m) im zentralen Bereich an und müssen diskutiert werden.

Die Anwendung der *Direct-push*-Leitfähigkeits- und Farbsonden liefert somit einen Beitrag zur tiefengenauen Beschreibung des Bauwerks sowie zur Rekonstruktion der Verfüllungen. Die laterale Auflösung von bis zu 25 cm und die vertikale Auflösung im Zentimeterbereich zeigen wichtige Details und bieten umfangreiche Möglichkeiten zur Interpretation der Verfüllungsprozesse.

Danksagung

Für die finanzielle Unterstützung danken die Autoren der Deutschen Forschungsgemeinschaft (Teilprojektnummern ZI 721/10-2, ZI 721/12-1, HA 7419/2-1, DI 833/19-1, ET 20/7-2 und BE 5111/2-1). – Weiterhin bedanken wir uns für die Hilfe bei den Rammkernsondierungen bei Dr. Eva Leitholdt und Andreas Schneider (Universität Leipzig) sowie für die Laboranalysen bei Dr. Brigit Schneider und Katja Pöhlmann (Universität Leipzig). – Für die technische

Durchführung der *Direct-push*-Sondierungen bedanken wir uns bei Helko Kotas und Manuel Kreck (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Leipzig). – Unser Dank gilt ebenfalls dem Bauhof Weißenburg für die technische Unterstützung sowie dem Eigentümer, dem Pächter und dem Landratsamt Weißenburg-Gunzenhausen für die Genehmigung.

Literatur

Ad-hoc-AG Boden 2006: Ad-hoc-AG Boden, Bodenkundliche Kartieranleitung. KA5 (Stuttgart 2006).

Barrett 2002: L. R. Barrett, Spectrophotometric color measurement in situ in well drained sandy soils. *Geoderma* 108/1-2, 2002, 49-77.

Bates/Bates 2000: M. R. Bates / C. R. Bates, Multidisciplinary Approaches to the Geoarchaeological Evaluation of Deeply Stratified Sedimentary Sequences. Examples from Pleistocene and Holocene Deposits in Southern England, United Kingdom. *Journal Arch. Scien.* 27/9, 2000, 845-858.

Berg-Hobohm/Werther 2014: S. Berg-Hobohm / L. Werther, Das rezente Erscheinungsbild des Karlsgrabens. In: Ettl u.a. 2014, 9-12.

Blume u.a. 2010: H.-P. Blume / G. W. Brümmer / R. Horn / E. Kandeler / I. Kögel-Knabner / R. Kretzschmar / K. Stahr / S. Thiele-Bruhn / G. Welp / B.-M. Wilke, Scheffer / Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde (Berlin 162010).

Bockius 2014: R. Bockius, Binnenfahrzeuge im Karolingerreich. In: Ettl u.a. 2014, 81-86.

Butler u.a. 1999: J. J. Butler / J. M. Healey / L. Zheng / G. W. McCall / M. K. Schulmeister, Hydrostratigraphic Characterization of Unconsolidated Alluvial Deposits with Direct-Push Sensor Technology. *Kansas Geol. Survey Open-File Report 99-40*, 1999. www.kgs.ku.edu/Hydro/Publications/OFR99_40/ (28. 1. 2019).

Christy/Christy/Wittig 1994: C. D. Christy / T. M. Christy / V. Wittig, A percussion probing tool for the direct sensing of soil conductivity. In: *Proceedings of the 8th National Outdoor Action Conference (Columbus OH 1994)* 381-394.

Cornell/Schwertmann 2003: R. M. Cornell / U. Schwertmann, *The Iron Oxides. Structure, Properties, Reactions, Occurrences, and Uses* (Weinheim 2003).

Dalan u.a. 2011: R. A. Dalan / B. W. Bevan / D. Goodman / D. Lynch / S. de Vore / S. Adamek / T. Martin / G. Holley / M. Michlovic, The Measurement and Analysis of Depth in Archaeological Geophysics. Tests at the Biesterfeldt Site, USA. *Arch. Prospection* 18/4, 2011, 245-265.

Dietrich/Leven 2009: P. Dietrich / C. Leven, Direct push-technologies. In: R. Kirsch (Hrsg.), *Groundwater geophysics. A tool for hydrogeology* (Berlin 2009) 347-366.

Döberl/Müller/Dörrie 2012: G. Döberl / D. Müller / T. Dörrie, Guideline. Section 1. In: M. Kästner / M. Braeckevelt / G. Döberl / G. Cassiani / M. P. Papini / C. Leven-Pfister / D. van Ree (Hrsg.), *Model-driven soil probing, site assessment and evaluation. Guidance on technologies* (Rome 2012) 1-16.

Doran 2013: G. H. Doran, Excavating wet sites. In: F. Menotti / A. O'Sullivan (Hrsg.), *The Oxford handbook of wetland archaeology* (Oxford 2013) 483-494.

- EPA 1997: EPA, Expedited Site Assessment Tools for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Regulators. Direct Push Technologies. United States Environmental Protection Agency, Office of Underground Storage Tanks (USTs) EPA 510-B-97-001/1997.
- Ettel u. a. 2014: P. Ettel / F. Daim / S. Berg-Hobohm / L. Werther / Ch. Zielhofer (Hrsg.), Großbaustelle 793. Das Kanalprojekt Karls des Großen zwischen Rhein und Donau [Ausstellungskat. Mainz u. a.]. Mosaiksteine. Forsch. RGZM 11 (Mainz 2014).
- Fischer u. a. 2016: P. Fischer / T. Wunderlich / W. Rabbel / A. Vött / T. Willershäuser / K. Baika / D. Rigakou / G. Metallinou, Combined Electrical Resistivity Tomography (ERT), Direct-Push Electrical Conductivity (DP-EC) Logging and Coring – A New Methodological Approach in Geoarchaeological Research. Arch. Prospection 23/3, 2016, 213-228.
- Grasmueck/Weger/Horstmeyer 2004: M. Grasmueck / R. Weger / H. Horstmeyer, Three-dimensional ground-penetrating radar imaging of sedimentary structures, fractures, and archaeological features at submeter resolution. Geology 32/11, 2004, 933.
- Hack 2014: A. Hack, Der Bau des Karlsgrabens nach den Schriftquellen. In: Ettel u. a. 2014, 53-62.
- Hartemink/Minasny 2014: A. E. Hartemink / B. Minasny, Towards digital soil morphometrics. Geoderma 230-231, 2014, 305-317.
- Hausmann u. a. 2013: J. Hausmann / H. Steinel / M. Kreck / U. Werban / T. Vienken / P. Dietrich, Two-dimensional geomorphological characterization of a filled abandoned meander using geophysical methods and soil sampling. Geomorphology 201, 2013, 335-343.
- Hausmann u. a. 2016: J. Hausmann / P. Dietrich / T. Vienken / U. Werban, Technique, analysis routines, and application of direct push-driven in situ color logging. Environmental Earth Scien. 75/11, 2016, 1-21.
- Hausmann u. a. 2018: J. Hausmann / Ch. Zielhofer / L. Werther / S. Berg-Hobohm / P. Dietrich / R. Heymann / U. Werban, Direct push sensing in wetland (geo)archaeology: High-resolution reconstruction of buried canal structures (Fossa Carolina, Germany). Quaternary Internat. 473, 2018, 21-36.
- Hoffmann/Ellmers 1990/1991: P. Hoffmann / D. Ellmers, Ein Frachter aus der Zeit Karls des Großen. Bremer Arch. Ser. N.F. 1, 1990/1991 (1990), 33-37.
- Koch 1996: R. Koch, Neue Beobachtungen und Forschungen zum Karlsgraben. Jahrb. Hist. Ver. Mittelfranken 97, 1996, 1-16.
- Koster 2016: K. Koster, Cone Penetration Testing. A Sound Method for Urban Archaeological Prospection. Arch. Prospection 23/1, 2016, 55-69.
- Lange 2005: G. Lange, 5. Geoelektrik. 5.3 Gleichstromgeoelektrik. In: K. Knödel / H. Krummel / G. Lange (Hrsg.), Geophysik. Handb. Erkundung Untergrund Deponiein u. Altlasten 3 (Berlin 2005) 128-174.
- Leitholdt/Krüger/Zielhofer 2014: E. Leitholdt / A. Krüger / Ch. Zielhofer, The medieval peat layer of the Fossa Carolina – Evidence for bridging the Central European Watershed or climate control? Zeitschr. Geomorphol. Suppl. 58/1, 2014, 189-209.
- Leitholdt u. a. 2012: E. Leitholdt / Ch. Zielhofer / S. Berg-Hobohm / K. Schnabl / B. Kopecky-Hermanns / J. Bussmann / J. W. Härtling / K. Reicherter / K. Unger, Fossa Carolina. The First Attempt to Bridge the Central European Watershed – A Review, New Findings, and Geoarchaeological Challenges. Geoarchaeology 27/1, 2012, 88-104.
- Leitholdt u. a. 2014: E. Leitholdt / Ch. Zielhofer / J. Bussmann / A. Stele, Durchbruch der Europäischen Hauptwasserscheide. Der zentrale Bereich der Fossa Carolina – offene Wasserflächen und Verhandlungsgeschichte. In: Ettel u. a. 2014, 15-20.
- Leven u. a. 2011: C. Leven / H. Weiß / T. Vienken / P. Dietrich, Direct-Push-Technologien – Effiziente Untersuchungsmethoden für die Untergrunderkundung. Grundwasser 16/4, 2011, 221-234.
- Lunne/Robertson/Powell 1997: T. Lunne / P. K. Robertson / J. J. M. Powell, Cone penetration testing in geotechnical practice (London 1997).
- Matney u. a. 2014: T. Matney / L. R. Barrett / M. B. Dawadi / D. Maki / C. Maxton / D. S. Perry / D. C. Roper / L. Somers / L. G. Whitman, In situ shallow subsurface reflectance spectroscopy of archaeological soils and features. A case-study of two Native American settlement sites in Kansas. Journal Arch. Scien. 43, 2014, 315-324.
- Nelson 2015: J. Nelson, Evidence in question: dendrochronology and early medieval historians. In: O. Kanō / J.-L. Lemaître (Hrsg.), Entre texte et histoire. Études d'histoire médiévale offertes au professeur Shoichi Sato. Arch. Hist. 65 (Paris 2015) 227-149.
- Papadopoulos u. a. 2006: N. G. Papadopoulos / P. Tsourlos / G. N. Tsokas / A. Sarris, Two-dimensional and three-dimensional resistivity imaging in archaeological site investigation. Arch. Prospection 13/3, 2006, 163-181.
- Prinz/Strauß 2011: H. Prinz / R. Strauß, Ingenieurgeologie (Heidelberg 52011).
- Robertson 1990: P. K. Robertson, Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal 27/1, 1990, 151-158.
- Schmidt-Kaler 1976: H. Schmidt-Kaler, Geologische Karte von Bayern. 7031 Treuchtlingen. 1:25 000 (München 1976).
- 1993: H. Schmidt-Kaler, Geologie und Landschaftsentwicklung im Rezat-Altmühl-Bereich (Geological structure and landscape dynamics in the Rezat and Altmühl valleys). In: R. Koch / G. Leininger (Hrsg.), Der Karlsgraben – Ergebnisse neuer Erkundungen. Bau intern. Special Issue Fossa Carolina (München 1993) 8-10.
- Schulmeister u. a. 2003a: M. K. Schulmeister / J. J. Butler / J. M. Healey / L. Zheng / D. A. Wysocki / G. W. McCall, Direct-Push Electrical Conductivity Logging for High-Resolution Hydrostratigraphic Characterization. Ground Water Monitor Remediation 23/3, 2003, 52-62.
- Schulmeister u. a. 2003b: M. K. Schulmeister / J. M. Healey / J. J. Butler / G. W. McCall / S. Birk, High-resolution characterization of chemical heterogeneity in an alluvial aquifer. IAHS Publ. 2003, 419-424.
- Vienken/Leven/Dietrich 2012: T. Vienken / C. Leven / P. Dietrich, Use of CPT and other direct push methods for (hydro-) stratigraphic aquifer characterization – a field study. Canadian Geotechnical Journal 49/2, 2012, 197-206.
- Weidelt 2005: P. Weidelt, 5. Geoelektrik. 5.1 Grundlagen. In: K. Knödel / H. Krummel / G. Lange (Hrsg.), Geophysik. Handb. Erkundung Untergrund Deponiein u. Altlasten 3 (Berlin 2005) 71-100.
- Werther/Feiner 2014: L. Werther / D. Feiner, Der Karlsgraben im Fokus der Archäologie. In: Ettel u. a. 2014, 33-40.
- Werther u. a. 2015: L. Werther / Ch. Zielhofer / F. Herzig / E. Leitholdt / M. Schneider / S. Linzen / S. Berg-Hobohm / P. Ettel /

A. Kirchner / S. Dunkel, Häfen verbinden. Neue Befunde zu Verlauf, wasserbaulichem Konzept und Verlandung des Karlsgrabens. In: Th. Schmidts / M. Vučetič (Hrsg.), Häfen im 1. Millennium AD. Bauliche Konzepte, herrschaftliche und religiöse Einflüsse. RGZM – Tagungen 22 (Mainz 2015).

Zielhofer/Kirchner 2014: Ch. Zielhofer / A. Kirchner, Naturräumliche Gunstlage der Fossa Carolina. In: Ettl u. a. 2014, 5-8.

Zielhofer u. a. 2014: Ch. Zielhofer / E. Leitholdt / L. Werther / A. Stele / J. Bussmann / S. Linzen / M. Schneider / C. Meyer /

S. Berg-Hobohm / P. Ettl / J. P. Hart, Charlemagne's Summit Canal. An Early Medieval Hydro-Engineering Project for Passing the Central European Watershed. PLoS ONE 9/9, 2014, e108194.

Zschornack/Leven-Pfister 2012: L. Zschornack / C. Leven-Pfister, Direct Push Tools for geophysical measurements. In: M. Kästner / M. Braechevelt / G. Döberl / G. Cassiani / M. P. Papini / C. Leven-Pfister / D. van Ree (Hrsg.), Model-driven soil probing, site assessment and evaluation. Guidance on technologies (Rom 2012) 165-174.

Zusammenfassung / Summary / Résumé

Minimalinvasive *Direct-push*-Erkundung in der Feuchtboden(geo)archäologie am Beispiel des Karlsgrabens (*Fossa Carolina*)

Archäologische Grabungen in Flussauen, Feuchtböden und feuchtbodenarchäologischen Fundstätten sind aufgrund von Grundwasserzustrom und instabilem Untergrund oft teuer und schwer durchführbar. Dennoch bieten diese Standorte sehr wichtige Fundstellen und Bodenarchive. Alternativ kommen Rammkernsondierungen zum Einsatz, bei denen jedoch Kompressionseffekte in den organischen Schichten zu ungenauen Tiefenangaben führen. In dieser Studie wird der Einsatz von tiefengenauen, minimalinvasiven *In-situ Direct-push*-Methoden zur hochauflösenden Erkundung von Bodendenkmälern im grundwassergesättigten Bereich vorgestellt. Exemplarisch wurde dazu die Grabenfüllung der frühmittelalterlichen *Fossa Carolina* (Karlsgraben) untersucht.

Die *Fossa Carolina* repräsentiert den ersten Versuch, eine durchgehende Schiffsverbindung vom Rhein zur Donau zu schaffen, und gilt als eines der bedeutendsten frühmittelalterlichen Bodendenkmäler in Europa. Mithilfe der hochauflösenden und tiefengenauen *In-situ Direct-push*-Sondierungen (elektrische Leitfähigkeit und Sedimentfarbe) wurden die räumlichen Dimensionen und anhand der dokumentierten Stratigraphie die Verlandungsgeschichte der ehemaligen Kanalrinne höhengenaue rekonstruiert.

Minimally Invasive Direct Push Sensing Investigation for Wetland (Geo)Archaeology: the Example of the *Fossa Carolina*

Archaeological excavations in floodplains and wetlands are often expensive and difficult to carry out due to ground water inflow and subsoil instability. However, these locations offer very important archaeological sites and archives. Alternatively, driving core techniques lack in imprecise depth accuracy caused by the effects of compacting the organic sediments. This study presents the application of depth-accurate, minimally invasive *in situ* direct push sensing techniques for the high-resolution exploration of archaeological structures below the ground water level. We also reconstruct the trench fillings of the early Medieval *Fossa Carolina*.

The *Fossa Carolina* represents the first attempt to create a continuous waterway from the Rhine to the Danube and is considered as one of the most important early Medieval monuments in Europe. The spatial extend and the aggradation history of the Carolingian trench were reconstructed by the application of high-resolution and depth-accurate direct push sensing techniques (electrical conductivity and sediment colour).

Études peu invasives en *direct-push* des milieux humides en (géo)archéologie à l'exemple de la Fosse Caroline

Les fouilles archéologiques dans les plaines alluviales et les zones palustres sont souvent coûteuses et difficiles à réaliser en raison de l'afflux d'eau souterraine et des dépôts instables. Néanmoins, ces endroits offrent des sites et archives archéologiques très importants. Alternativement, les carottages ne donnent pas les résultats escomptés à cause des effets de compression dans les couches organiques qui entraînent des profondeurs inexactes. Cette étude présente l'utilisation de méthodes d'*in situ direct push*, minimalement invasives et à profondeur précise pour l'exploration à haute résolution de monuments archéologiques dans la zone saturée d'eau souterraine. A titre d'exemple, le remplissage des tranchées de la Fosse Caroline (*Karlsgraben*) ont été examinés.

La Fosse Caroline est une construction du début du Moyen Âge, qui a été initié par Charlemagne. La construction représente la première tentative de créer une connexion continue entre le Rhin et le Danube et est considérée comme l'un des monuments médiévaux les plus importants d'Europe. À l'aide des sondages *d'in situ direct push* (conductivité électrique et couleur des sédiments), les dimensions et l'historique de l'alluvionnement de l'ancien canal ont été reconstitués précisément, y compris sur les profondeurs.

Schlüsselwörter / Keywords / Mots clés

Bayern / Karolingerzeit / Feuchtbodenarchäologie / elektrische Leitfähigkeit / Sedimentfarbe
Bavaria / Carolingian period / wetland geoarchaeology / electrical conductivity / sediment colour
Bavière / époque carolingienne / archéologie des zones humides / conductivité électrique / couleur de sédiment

Johannes Völlmer

Christoph Zielhofer

Johannes Schmidt

Universität Leipzig
Institut für Geographie
Lehrstuhl Physische Geographie
Johannisallee 19a
04103 Leipzig
j.voellmer@uni-leipzig.de
zielhofer@uni-leipzig.de
j.schmidt@uni-leipzig.de

Jörg Hausmann

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
Department Monitoring- und Erkundungstechnologien
Permoserstr. 15
04318 Leipzig
und
Basalt-Actien-Gesellschaft
Abteilung Umwelt Rohstoffe Liegenschaften
Lilienthalstr. 8
04509 Wiedemar
hausmann@basalt.de

Ulrike Werban

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
Department Monitoring- und Erkundungstechnologien
Permoserstr. 15
04318 Leipzig
ulrike.werban@ufz.de

Peter Dietrich

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
Department Monitoring- und Erkundungstechnologien
Permoserstr. 15
04318 Leipzig
und
Eberhard Karls Universität Tübingen
Zentrum für Angewandte Geowissenschaften
Umwelt- und Ingenieurgeophysik
Hölderlinstr. 12
72074 Tübingen
peter.dietrich@ufz.de

Lukas Werther

Friedrich-Schiller-Universität Jena
Institut für Orientalistik, Indogermanistik und Ur- und Frühgeschichtliche
Archäologie, Seminar für Ur- und Frühgeschichtliche Archäologie
Löbdergraben 24a
07743 Jena
lukas.werther@uni-jena.de

Stefanie Berg

Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (BLfD)
Praktische Denkmalpflege – Bodendenkmäler, Lineare Projekte
Hofgraben 4
80539 München
stefanie.berg@blfd.bayern.de