

Hannah Baumert



**Sedimentologische Untersuchungen
am Schwemmfächer von El Almendral
(Südspanien)**

Sedimentological investigations
on the alluvial fan near El Almendral
(Southern Spain)



Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik

Lehr- und Forschungsgebiet Neotektonik und Georisiken

Sedimentologische Untersuchungen am Schwemmfächer von El Almendral (Südspanien)

Sedimentological investigations on the alluvial fan near
El Almendral (Southern Spain)

Arbeit zum Erhalt des Grades
Bachelor of Science
in
Angewandte Geowissenschaften

vorgelegt von:

Hannah Baumert
Matrikel-Nr.: 274291
September 2010

Betreuer: Prof. Dr. Klaus Reicherter
Dr. Martin Kehl

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die Bachelorarbeit mit dem Titel „Sedimentologische Untersuchungen am Schwemmfächer von El Almendral (Südspanien)“ selbständig verfasst und alle Quellen und Hilfsmittel vollständig angegebenen habe. Alle aus den benutzten Quellen entnommenen Stellen habe ich als solche kenntlich gemacht. Alle Grafiken und Fotos ohne Quellenangaben, einschließlich des Titelbildes, wurden von mir erstellt.

Ich erkläre weiterhin mein Einverständnis, dass diese Arbeit unter Wahrung meines Urheberrechts eingesehen werden darf. Auszüge daraus dürfen kopiert werden, sofern ich als Urheber genannt werde.

Bibliographische Angaben zu dieser Arbeit dürfen sowohl im Bibliothekskatalog als auch auf den Internetseiten des Lehr- und Forschungsgebietes "Neotektonik und Georisiken", des Geologischen Instituts und der Hochschulbibliothek der RWTH Aachen verzeichnet werden.

Aachen, den 27. September 2010

Hannah Baumert

Zusammenfassung

Die sedimentologischen Untersuchungen am Schwemmfächer von El Almendral hatten mehrere Ziele: Die chronostratigraphische Einordnung der Schichten, Rückschlüsse auf die Umweltbedingungen zur Bodenbildungszeit (und somit auf das damalige Klima) und Informationen über Herkunft und Transportwege des Sediments.

Diese Ziele wurden bedingt erreicht. Eine erste grobe chronostratigraphische Gliederung in pleistozäne und holozäne Sedimente gelang, außerdem wurde anstehendes Gestein als tortonischer Kalkarenit identifiziert. Diese Gliederung muss jedoch noch durch absolute Datierung überprüft werden.

Für die Herkunft der Grobfraktion wurden Vermutungen aufgestellt, sie konnte aber anhand der Untersuchungsergebnisse nicht befriedigend geklärt werden.

Die Untersuchungsmethoden selbst erwiesen sich als unterschiedlich effizient; Farb- und Faziesbestimmung lieferten bei vergleichsweise geringem Aufwand die schnellsten Ergebnisse, während pH-Werte und elektrische Leitfähigkeiten keine Auffälligkeiten zeigten und nur bedingt zur Interpretation der Lagen herangezogen werden konnten.

Die Ergebnisse der CN-Analyse ließen sich zwar überwiegend mit Farbe und Fazies korrelieren, jedoch lagen nicht genügend Daten vor, um damit Bodenbildungs- und Klimaverhältnisse verlässlich rekonstruieren zu können.

Schlagwörter: Boden, Bohrkern, Sedimentologie, Schwemmfächer, El Almendral, Paläoklimatologie

Abstract

The sedimentological investigations on the alluvial fan near El Almendral had several aims: The chronostratigraphical classification of the soil layers, conclusions about environmental conditions during the pedogenesis (thus also about the climate at that time) and information about the origin and transport of the sediments.

These aims have been partially achieved. A new rough chronostratigraphical classification into Pleistocene and Holocene sediments was successful. Furthermore, bedrock was identified as carbonatic arenite from the Tortonian. This classification, however, must be verified by absolute dating.

Some assumptions have been made concerning the origin of the coarse fraction although they could not be supported sufficiently by the findings of the investigations.

The research methods themselves proved to be unequally efficient; the determination of color and facies provided the quickest results with comparatively little effort while pH-values and electrical conductivity showed no irregularities and could be used for the interpretation of the layers only conditionally.

The results of the CN-analysis could mostly be correlated to color and facies, but there was not enough data to reconstruct pedogenesis and climate conditions reliably.

Keywords: soil, drill core, Sedimentology, alluvial fan, El Almendral, Palaeoclimatology

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	9
1.1 Zielsetzung.....	9
1.2 Sonderforschungsbereich 806: „Our way to Europe”	9
2 Untersuchungsgebiet.....	11
2.1 Geographische Lage	11
2.2 Geologie	12
2.2.1 Geologie Südspaniens	12
2.2.2 Geologie des Untersuchungsgebietes.....	15
2.3 Landnutzung und Vegetation.....	17
2.4 Boden.....	18
2.5 Klima	18
3 Methoden.....	20
3.1 Geländearbeit und Probenahme	20
3.2 Bodenfarbe.....	21
3.2.1 MUNSELL-Farbtafel	21
3.2.2 Alternative Messmethoden	23
3.2.3 Farbgebende Komponenten und Bodenbildungsverhältnisse	23
3.3 Fazies.....	24
3.3.1 Fingerprobe	24
3.3.2 Skelettanteil.....	25
3.3.3 Alternative Messmethoden	26
3.4 Messung des pH-Wertes	26
3.5 Messung der elektrischen Leitfähigkeit	27
3.6 CN-Analyse	28
3.6.1 HCl-Schnelltest.....	30
3.6.2 CN-Elementaranalysator	31

4 Ergebnisse.....	33
4.1 Bodenfarbe.....	35
4.2 Fazies.....	36
4.3 pH-Werte.....	39
4.4 Elektrische Leitfähigkeit.....	41
4.5 CN-Analyse.....	44
5 Diskussion.....	47
6 Fazit.....	54
7 Quellen.....	56
8 Anhang.....	59

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Luftaufnahme der Polje von Zafarraya mit dem Schwemmfächer von El Almendral (helle Fläche). In blau entlang des Schwemmfächers nachgezogen: Entwässerungsgraben und Arroyo de la Madre (Luftaufnahme nach Google Earth, 20. Juni 2010).....	11
Abb. 2: Überhöhter Profilschnitt vom oberen Schwemmfächer bis zur Ortschaft Zafarraya (nach Google Earth, 2. August 2002).....	12
Abb. 3: Betische Kordillere mit Innenzone, Außenzone, Flysch-Zone und Neogenen Becken (nach REICHERTER & PETERS, 2005).....	13
Abb. 4: Geologische Karte der Polje von Zafarraya (nach SCHRAMM, 2010).....	16
Abb. 5: Weideland im mittleren Teil des Schwemmfächers mit Mandelbäumen (noch unbelaubt, Vordergrund) und Steineichen (belaubt, Hintergrund). Zwischen dem Bewuchs und Kalkstein ist deutlich rotbrauner Boden zu sehen.	18
Abb. 6: Durchschnittliche Temperaturen und Niederschläge pro Monat im Jahresverlauf in Granada-Aeropuerto (1972 bis 2000, nach Daten der Agencia Estatal de Meteorología, 2010).....	19
Abb. 7: Lage der Bohrungen am Schwemmfächer vom El Almendral. Die rote Linie markiert das Höhenprofil (Abb. 2), Hellblau markiert den Arroyo de la Madre und	

Dunkelblau den Entwässerungsgraben entlang des Schwemmfächers (nach Google Earth, 20. Juni 2010)	20
Abb. 8: Schematische Darstellung des Farbsystems nach MUNSELL mit den drei Komponenten Farbton, Sättigung und Helligkeit	22
Abb. 9: Veranschaulichung eines Farbcodes nach MUNSELL.....	22
Abb. 10: Schematische Darstellung der Einflussfaktoren Verfügbarkeit organischen Materials, Klima, Sedimentationsrate und Alter und deren Auswirkung auf den organischen Kohlenstoffgehalt (hier „C“) im Boden	29
Abb. 11: Profil der Bohrung 2	34
Abb. 12: Skelettanteile der Bohrung 1, 2, 3, 7 und 10. Für die Bohrungen 2 und 7 wurden die gravimetrisch bestimmten Anteile aufgetragen, für die übrigen Bohrungen näherungsweise der flächenbezogene Anteil.	37
Abb. 13: pH-Werte (in Suspension gemessen) von Bohrung 2	39
Abb. 14: pH-Werte (in Suspension gemessen) von Bohrung 3	40
Abb. 15: pH-Werte (in Suspension gemessen) von Bohrung 10	41
Abb. 16: Werte der elektrischen Leitfähigkeit (in mS/cm) von Bohrung 2	42
Abb. 17: Werte der elektrischen Leitfähigkeit (in mS/cm) von Bohrung 7	42
Abb. 18: Werte der elektrischen Leitfähigkeit (in mS/cm) von Bohrung 3.....	43
Abb. 19: Kohlenstoffgehalt, Stickstoffgehalt und C/N-Verhältnis von Bohrung 2 (das C/N-Verhältnis übersteigt in den unteren beiden Lagen 1000 und wurde abgeschnitten)	44
Abb. 20: Kohlenstoffgehalt und Stickstoffgehalt von Bohrung 2 (der Kohlenstoffgehalt der unteren beiden Lagen liegt über 7 % und wurde abgeschnitten).....	44
Abb. 21: Kohlenstoffgehalt, Stickstoffgehalt und C/N-Verhältnis von Bohrung 3	45
Abb. 22: Kohlenstoffgehalt und Stickstoffgehalt von Bohrung 3	45
Abb. 23: Stratigraphische Einordnung von Bohrung 1. Diese erste Einschätzung weist eine Diskordanz zwischen den Schichten des Miozäns und Pleistozäns auf. .	49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Unterschiede zwischen Feld- und Labormessung des Skeletts in Bohrung 2; rot: Flächenanteile (Feldkürzel), grün: Massenanteile, blau: Massenanteile in Feldkürzeln. Legende zu Feldkürzeln: Anhang M.....	51
---	----

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der sedimentologischen Untersuchung von Bohrproben aus dem Schwemmfächer von El Almendral. Als Teil eines Forschungsprojektes sollen mit der Arbeit neue Daten gewonnen werden, die Rückschlüsse auf die Umweltbedingungen im späten Quartär zulassen, der Zeit in der der Neanderthaler und der anatomisch moderne Mensch von Afrika nach Europa zogen.

Die Daten sollen Informationen zu Bodenbildungsverhältnissen und Geomorphodynamik (Veränderung des Reliefs) liefern, woraus auf das damalige Klima geschlossen werden kann. Weiteres Ziel ist eine erste relative Datierung der Bodenschichten durch chronostratigraphische Einordnung.

Die zu untersuchenden Bodenproben wurden in der südspanischen Gemeinde Zafarraya (Provinz Granada) im Zuge einer Geländekampagne genommen. Die Kampagne fand vom 7. bis 26. März 2010 unter der Leitung von Prof. Dr. Klaus Reicherter (Lehr- und Forschungsgebiet Neotektonik und Georisiken der Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen) und Dr. Martin Kehl (Geographisches Institut, Universität zu Köln) statt und ist Teil des C1-Clusters des Sonderforschungsbereichs 806.

1.2 Sonderforschungsbereich 806: „Our way to Europe“

Der Sonderforschungsbereich (SFB) 806 wird von der Universität zu Köln geleitet; weitere Beteiligte sind die RWTH Aachen, die Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn und das Neanderthal Museum in Mettmann. Gefördert wird das Projekt von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG).

Ziel des SFB 806 sind präzisere Erkenntnisse darüber, wie die damaligen Umweltverhältnisse die Kultur, Mobilität und Verbreitung des modernen Menschen auf seinem Weg von Afrika nach Europa beeinflussten. Hierfür wurden archäologische, terrestrische und aquatische Archive untersucht, wobei die

Forschung die Zeitspanne zwischen der Verbreitung des modernen Menschen aus Afrika bis zu seiner dauerhaften Sesshaftigkeit in Zentraleuropa umfasst.

Cluster C: „The Western Mediterranean - Bridge or Barrier?“

In Cluster C wird die westliche Route des Menschen von Afrika nach Europa über die Straße von Gibraltar betrachtet. Der Titel des Clusters lässt erkennen, dass geklärt werden soll, ob die Lebensbedingungen im westlichen Mittelmeerraum eher fördernd waren oder die Ausbreitung des modernen Menschen gehemmt haben. Das Cluster untersucht also, welchen Einfluss der Klimawandel auf die Bevölkerungsdynamik (Völkerwanderung, Niederlassungsverhalten) und Kulturveränderungen zur damaligen Zeit hatte.

Hierbei kommen sowohl archäologische als auch geowissenschaftlichen Methoden zum Einsatz. Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich von Frankreich über Spanien und Portugal bis nach Marokko.

Diese Arbeit gehört dem Bereich C1 des Clusters an, welcher sich speziell mit Landnutzung und Klimaveränderungen auf der Iberischen Halbinsel befasst. Im Zuge mehrerer Geländekampagnen, wie der Kampagne im März 2010, werden hierfür terrestrische Archive geophysikalisch und sedimentologisch untersucht.

Weitere Informationen zu dem Forschungsprojekt gibt es auf der Internetseite des SFB 806.

2 Untersuchungsgebiet

In diesem Kapitel werden der Schwemmfächer von El Almendral und die umliegende Polje von Zafarraya charakterisiert.

2.1 Geographische Lage

Das Untersuchungsgebiet befindet sich in der südspanischen Gemeinde Zafarraya, welche zur Provinz Granada gehört und etwa 50 km südwestlich der Stadt Granada liegt. Untersuchungsobjekt ist der Schwemmfächer von El Almendral, welcher nach Süden in die Polje von Zafarraya mündet.

Die Polje von Zafarraya ist nach der größten Ortschaft (rund 2000 Einwohner) benannt, hat eine Länge von etwa 10 km (West-Ost) und eine Breite von etwa 3,5 km (Nord-Süd).

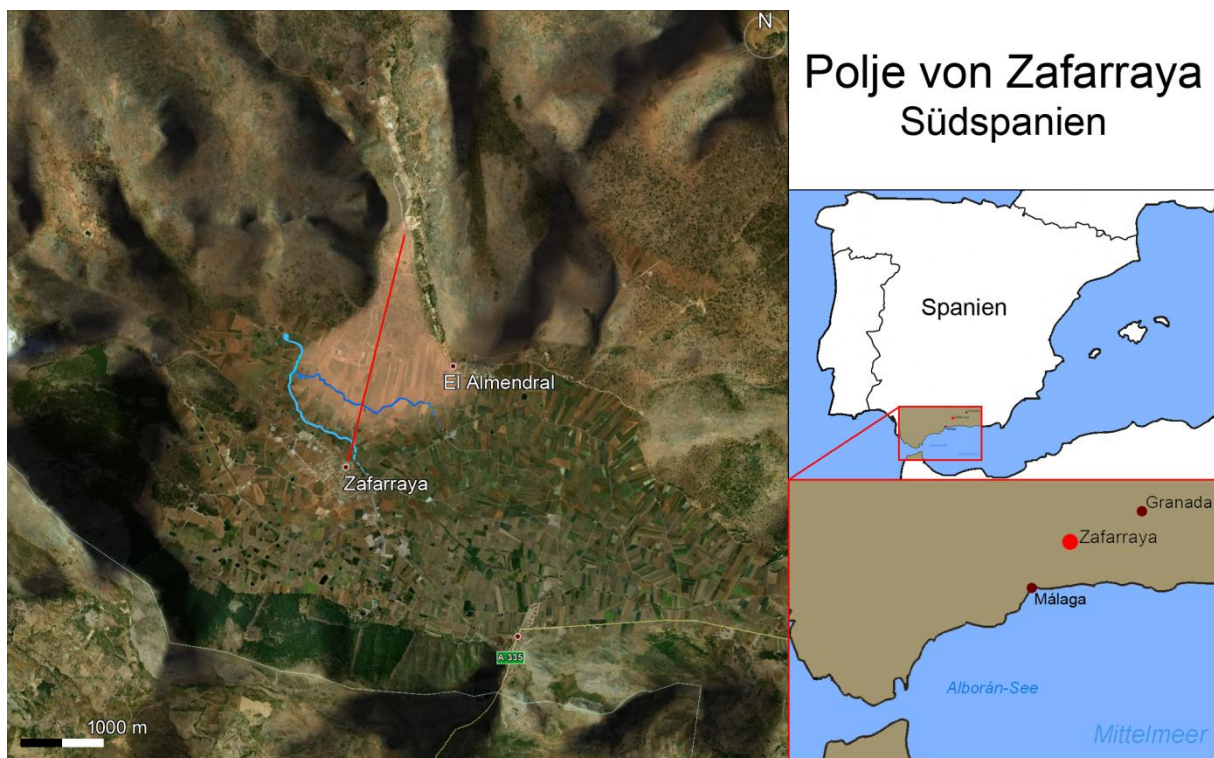


Abb. 1: Luftaufnahme der Polje von Zafarraya mit dem Schwemmfächer von El Almendral (helle Fläche). In blau entlang des Schwemmfächers nachgezogen: Entwässerungsgraben und Arroyo de la Madre (Luftaufnahme nach Google Earth, 20. Juni 2010).

Der Verlauf des Fächers erfolgt von Nord-Nordost nach Süd-Südwest; in der Länge misst er etwa 2,5 km und am Fuß etwa 1,7 km in der Breite. Die Koordinaten des Fächers lauten $36^{\circ}59'30''$ N und $4^{\circ}08'12''$ W, wobei die mittlere Höhe etwa 900 m über NN beträgt und aufgrund der Fächerform variiert.

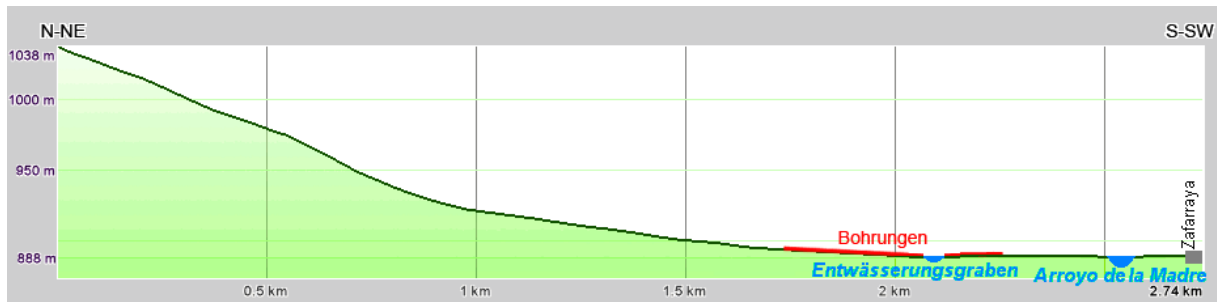


Abb. 2: Überhöhter Profilschnitt vom oberen Schwemmfächer bis zur Ortschaft Zafarraya (nach Google Earth, 2. August 2002)

Abbildung 2 zeigt einen überhöhten Profilschnitt durch den Schwemmfächer bis zur Ortschaft Zafarraya mit einem Entwässerungsgraben und dem Bach Arroyo de la Madre. Beide Gewässer verlaufen im Bereich des Schwemmfächers etwa halbkreisförmig, wobei der Bach an der Ortschaft umgeleitet wird und dort parallel zur Straße fließt. Bei genauerem Hinsehen nimmt die Höhe vom oberen Schwemmfächer bis zu dem Entwässerungsgraben zwar kontinuierlich ab, steigt dahinter aber wieder minimal, um erst wieder beim Arroyo de la Madre zu sinken. Hierfür kann es verschiedene Gründe geben; zum einen könnte der (anthropogen angelegte) Entwässerungsgraben den Rand des Schwemmfächers markieren, zum anderen könnte die Vertiefung dort auch durch Abtragung der oberen Sedimentschichten in den Entwässerungsgraben entstanden sein.

2.2 Geologie

Es folgen ein großräumiger Überblick über die Geologie Südspaniens und geologische Details zum Untersuchungsgebiet.

2.2.1 Geologie Südspaniens

An der Grenze von Kreide zu Tertiär, zur Zeit der Alpidischen Orogenese, entstand durch die Nord-Süd-Konvergenz der Eurasischen und Afrikanischen Platte ein Faltengebirge: Die Betische Kordillere. Sie erstreckt sich auf etwa 600 km entlang der Südküste der Iberischen Halbinsel und wird geologisch in folgende Gebiete unterteilt: Die im Süden liegende Interne Zone (auch Innenzone), die nördlichere Externe Zone (auch Außenzone), die Flysch-Zone und die Neogenen (intramontanen) Becken.

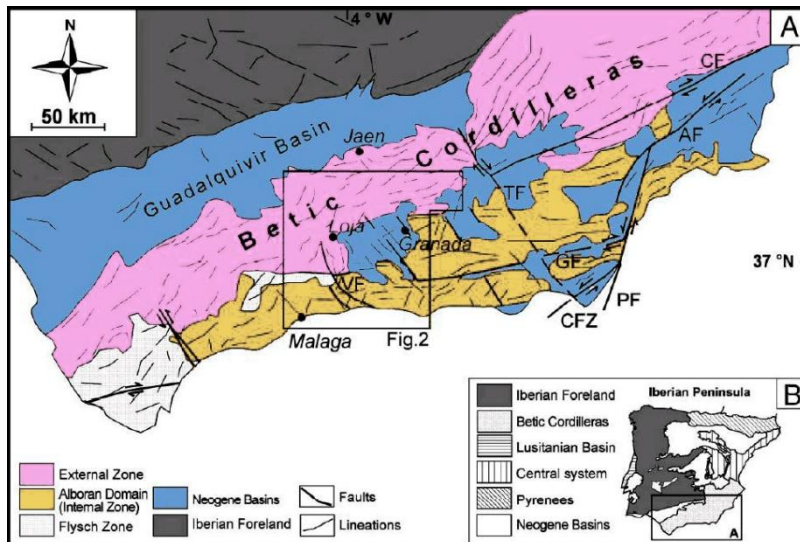


Abb. 3: Betische Kordillere mit Innenzone, Außenzone, Flysch-Zone und Neogenen Becken (nach REICHERTER & PETERS, 2005)

Die Interne Zone ist auf die Externe Zone aufgeschoben und weist von Nord nach Süd verschiedene Metamorphosegrade auf. Sie wird daher nach AZANÓN et al. (2002) in folgende Komplexe eingeteilt: Nevado-Filábride-Komplex (NFK; obere Grünschiefer-Amphibolitfazies), Alpujárride-Komplex (AK; untere Grünschieferfazies) und Maláguide-Komplex (MK; nicht metamorph).

Die etwa Nordwest-Südost-gerichtete Kompression während der Alpidischen Orogenese bewirkte eine Hochdruck-Niedertemperatur-Metamorphose, welche die Deckenkomplexe der Internen Zone bildete. Hierbei war zuerst im Liegenden der NFK betroffen, dann der AK (AZANÓN et al., 2002).

Die Interne Zone gehört dem Mikrokontinent Alborán an, der jedoch zum Iberischen Kontinent gezählt wird, da der Meeresarm der Tethys im Mesozoikum als Aulakogen interpretiert wird und nicht eigenständiger Natur ist (REICHERTER, 1994). Entsprechend ist die Kruste unter der Alborán-See (dem westlichsten Teil des Mittelmeeres) kontinentaler Natur, wenn auch stark ausgedünnt auf etwa 13 bis 20 km (PLATT & VISSERS, 1989). Die westwärts gerichtete Bewegung des Alborán-Mikrokontinents seit dem Übergang Paläogen-Miozän verändert zusätzlich die Spannungsverhältnisse im Süd-Iberischen Raum (AZANÓN et al., 2002).

Die Entstehung des Rif-Betikum-Orogenbogens um die Alborán-See ist bisher ungeklärt, es gibt jedoch verschiedene Theorien. Die aktuell populärste Theorie ist die von PLATT & VISSERS (1989), welche von einem radialen Extensionskollaps im oberen Oligozän durch die krustale Delamination der stark verdickten Gebirgswurzel ausgeht; das heißt die Lithosphäre löste sich hier von der Asthenosphäre. Die

Delamination ist verbunden mit erhöhter vulkanischer Aktivität; dort wo die Lithosphäre herabsinkt, tritt die Asthenosphäre nahe an die Erdoberfläche. Als Beleg hierfür können syn- und postorogene Vulkanite und Gangvorkommen herangezogen werden (TURNER et al., 1999).

Seit dem späten Tortonium herrscht in der Internen Zone aufgrund der Nordwest-Südost-Kollision eine Kompression, die zur Hebung und Faltung des Gebietes und somit der Entstehung der heutigen Sierras führt. Senkrecht zur Kompression findet in nordost-südwestlicher Richtung eine Extension statt, welche zu Abschiebungen, Transformstörungen und einer starken Subsidenz der Alborán-See seit dem Neogen führt (PLATT & VISSERS, 1989).

Die Flysch-Zone erstreckt sich über die Straße von Gibraltar (Flysche von Campo de Gibraltar) entlang der Intern-Extern-Grenze bis zum Becken von Granada. Bei den Flyschen handelt es sich um mesozoisch-tertiäre Sedimente, die allgemein als Fortsatz der afrikanischen Flysch-Überschiebungen angesehen werden und über Teilen der Internen Zone liegen (REICHERTER et al., 2003 und LEBLANC, 1990).

Die nördlicher gelegene Externe Zone wird in Subbetikum (Beckenserie) und Präbetikum (Schelfserie) unterteilt und ist nicht metamorph (HERBIG, 1984). Das Subbetikum repräsentiert einen Vorland-Überschiebungsgürtel, welcher im frühen Miozän durch die Kollision mit dem Alborán-Mikrokontinent entstand. Weiterhin finden sich dort postorogene Blattverschiebungen und Abschiebungen. Seit dem Miozän findet eine kontinentale Subduktion der Externen Zone statt: Zuerst unter die Interne Zone, dann unter die Alborán-See. Hierdurch wird das Gebiet weiter in Nord-Süd-Richtung verkürzt. Durch die Kompression im Miozän wurde die Externe Zone außerdem zu dünnen Decken gestapelt und versetzt, wobei teilweise eine Überschiebung des Subbetikums auf das Präbetikum stattfand.

Bei den Neogenen Becken handelt es sich um Grabenstrukturen und Synklinalen, welche durch Transformstörungen und großflächige Abschiebungen gegen Ende der Alpidischen Orogenese entstanden und entlang der Grenze zwischen Intern- und Extern-Zone liegen. Im Tortonium wurden große Teile der Kordilleren durch das Alborán-Meer bedeckt; marine Sedimente lagerten sich ab und füllten die intramontanen Becken. Während der letzten Stufe des Miozäns, dem Messinium,

trocknete das Meer fast vollständig aus; der Salzgehalt stieg entsprechend an („Messinische Salinitätskrise“) und in den Becken entstanden mächtige Evaporite. Nach dem vollständigen Trockenfallen an der Grenze von Pliozän zu Pleistozän bildeten sich terrestrische Sequenzen.

Auch heute wird die Betische Kordillere weiter angehoben und weist Extensionsstörungen auf. Dies und die Schrumpfung der Alborán-See sind auf ein Spannungsfeld zurückzuführen, welches von dem Mittelozeanische Rücken und der andauernden Konvergenz der Afrikanischen und Eurasischen Platte hervorgerufen wird.

2.2.2 Geologie des Untersuchungsgebietes

Bei der Polje von Zafarraya handelt es sich um ein kleines, verkarstetes Becken im Süden der Sierra Gorda, welches mit alluvialen und kolluvialen Ablagerungen des Quartärs gefüllt ist. Unter dem quartären Sediment wurden Kalkarenite aus dem Tortonium erbohrt. Das Gesteinsinventar des angrenzenden Gebirges besteht vor allem aus jurassischem und kreidezeitlichem Kalkstein, Mergelkalk und Dolomit mit Einlagerungen von Feuerstein. Im Süden wird das Becken durch die Ventas-de-Zafarraya-Störung (am nördlichen Rand der Sierra Tejada) begrenzt und bildet einen Halbgraben. Die Ventas-de-Zafarraya-Störung streicht von West-Nordwest nach Ost-Südost und fällt in einem Winkel von 60° nach Nord-Nordost ein (REICHERTER et al., 2003) und entstand vermutlich durch die Nordost-Südwest-Extension. Die Störung besteht hauptsächlich aus steil einfallenden Abschiebungen, jedoch sind auch vereinzelt Blattverschiebungen zu finden. Das große Erdbeben von 1884 mit einer Magnitude von 6,7 (REICHERTER et al., 2003) wird auf diese Störung zurückgeführt (GALINDO-ZALDÍVAR et al., 2003).

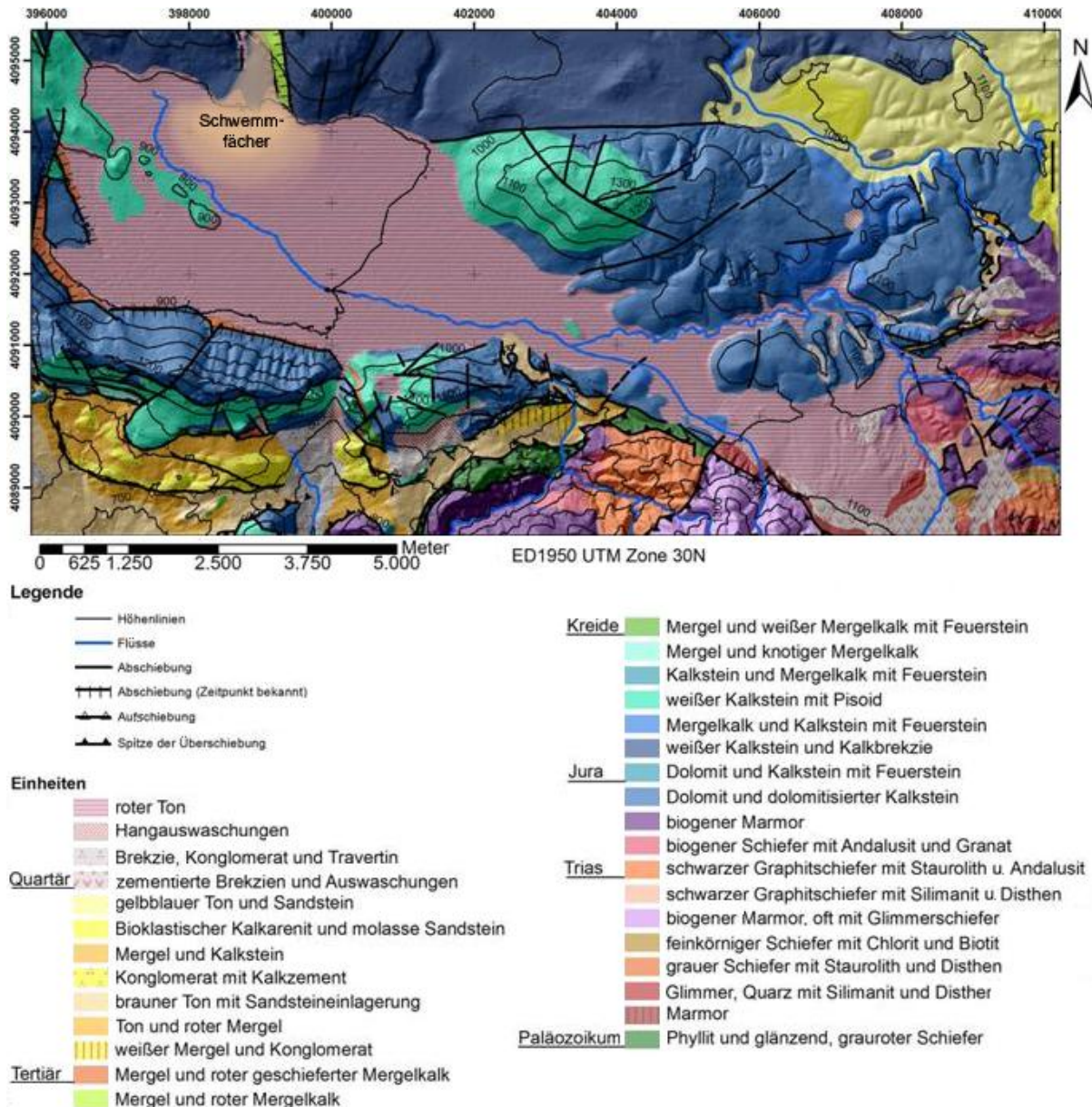


Abb. 4: Geologische Karte der Polje von Zafarraya (nach SCHRAMM, 2010)

Es gibt eine Vielzahl an Definitionen für Poljen; so fasst NICOD (2003) die typische Definition einer Polje folgendermaßen zusammen: Großes geschlossenes Becken mit flachem Grund, Karstentwässerung und steilen peripheren Hängen.

Das Gebiet um Zafarraya ist tatsächlich wannenförmig von Bergen umgeben und wie oben bereits erwähnt durch sedimentäre Verfüllung geebnet. Oberflächenwasser versickert hier rasch in den durch chemische Verwitterung und Abrieb gebildeten Rissen, Klüften und Ponoren („Schlucklöchern“, nach GOUDIE (2004) ein weiteres Poljen-Merkmal) des Carbonatgesteins, welches auch zahlreiche unterirdische Höhlen aufweist. In diesen Höhlen sammelt sich der Niederschlag der Polje, aber auch unterirdisch zufließendes Wasser aus der weiteren Umgebung. Infolge langer

Regenperioden können sich die Höhlen vollständig füllen und bei übermäßigem Wasserzustrom durch die Ponore wieder auslaufen. Die Polje von Zafarraya wurde so schon mehrfach überflutet, zuletzt an Weihnachten 1996 (DURÁN & LÓPEZ MARTÍNEZ, 1998). Einziges oberflächliches Fließgewässer ist heute der Arroyo de la Madre, welcher nur temporär Wasser führt und in einen Ponor mündet.

Der Schwemmfächer von El Almendral ist flach (durchschnittlich nur etwa 6 % Steigung), weist verhältnismäßig kleine Korngrößen auf und wird landwirtschaftlich genutzt. Diese Merkmale sind nach AHNERT (2003) typisch für Schwemmfächer in humiden Gebieten, die durch chemische Verwitterung geprägt sind. Vereinzelt größere Klaster dagegen sind ein Hinweis für zusätzliche mechanische Verwitterung. An der Geländeoberfläche im mittleren Teil des Schwemmfächers sind zudem Kalksteinblöcke zu finden. Es handelt sich um Verwitterungsprodukte des anstehenden Kalksteins (vergl. Abb. 4) und Geröll vom westlich angrenzenden Berghang (20 % Steigung). Da das Geröll an einigen Stellen sehr konzentriert und teils gestapelt auftritt, ist auch von anthropogener Ablagerung auszugehen.

2.3 Landnutzung und Vegetation

Die Polje von Zafarraya wird landwirtschaftlich genutzt. Der obere Teil des Schwemmfächers dient als Weideland (Schafe, Ziegen), am Ostrand befinden sich zudem einige ehemalige Steinbrüche (Schotterabbau), in denen vereinzelt kleine Olivenplantagen angelegt wurden. Am Fuße des Schwemmfächers wird, wie in der gesamten Polje, Ackerbau betrieben; die Felder werden im Sommer, bedingt durch Trockenheit, bewässert.

Das Weideland am oberen Teil des Schwemmfächers ist überwiegend mit kurzem Gras und Kräutern bedeckt. Vereinzelt finden sich Mandelbäume (*Prunus dulcis*), Steineichen (*Quercus ilex*) und Korkeichen (*Quercus suber*), welche Überreste der natürlichen zonalen Vegetation (immergrüner Hartlaubwald, sogenannte „Macchie“) darstellen (WALTER & BRECKLE, 1999).

Als Ackerpflanzen werden vor allem Artischocken, Getreide und einige Blattsalate angebaut, außerdem Tomaten.



Abb. 5: Weideland im mittleren Teil des Schwemmfächers mit Mandelbäumen (noch unbelaubt, Vordergrund) und Steineichen (belaubt, Hintergrund). Zwischen dem Bewuchs und Kalkstein ist deutlich rotbrauner Boden zu sehen.

2.4 Boden

Typisch für den Mittelmeerraum sind alkalische, humusarme, lessivierte Böden, welche sich auf Carbonatgestein entwickelt haben. In den ariden Sommermonaten trocknen die Böden schnell aus, so dass bei fehlender Vegetation eine erhöhte Erosionsgefahr besteht.

Mediterrane Böden sind im Oberboden häufig entkalkt, während es im Unterboden sekundäre Tonanreicherungen gibt. Durch Hämatit erhalten die Böden zudem teils intensive Rotfärbungen (SCHULTZ, 2008, s. auch Abb. 5).

2.5 Klima

Das Untersuchungsgebiet liegt in den winterfeuchten (mediterranen) Subtropen. Die Sommer sind aufgrund subtropisch-randtropischer Hochdruckgebiete trocken,

während im Winter die Luftdruckzellen Richtung Äquator wandern und niederschlagsreicheres, kühleres Wetter der Mittelbreiten herrscht (SCHULTZ, 2008).

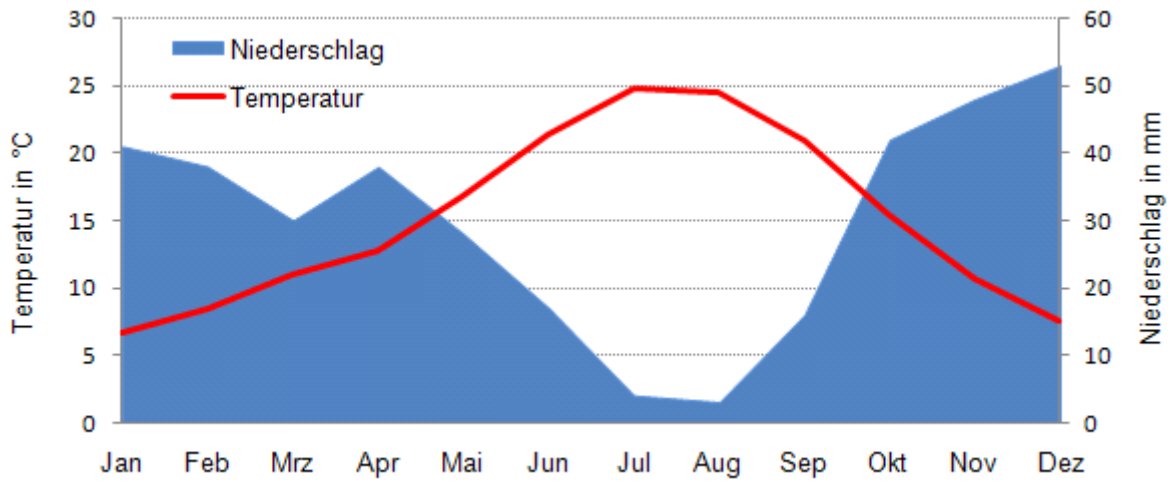


Abb. 6: Durchschnittliche Temperaturen und Niederschläge pro Monat im Jahresverlauf in Granada-Aeropuerto (1972 bis 2000, nach Daten der Agencia Estatal de Meteorología, 2010)

Abbildung 6 zeigt den durchschnittlichen Jahresverlauf von Temperatur und Niederschlag bei Granada-Aeropuerto, welches etwa 40 km nordöstlich von El Almendral und 570 m über NN liegt. Nach WALTER et al. (1960) sind die Monate Mai bis Oktober als arid zu bezeichnen, während die restlichen Monate als humid gelten. Diese Daten sind jedoch nur bedingt auf die Polje von Zafarraya übertragbar, da diese rund 300 m höher liegt und kesselförmig von einer Bergkette umgeben ist. Der Stadtrat der Gemeinde Zafarraya (Ayuntamiento de Zafarraya, 2010) beschreibt das lokale Mikroklima als mediterran mit leichten kontinentalen Zügen, bei denen die Sommer nicht so heiß werden wie im rein mediterranen Klima, die Winter jedoch sehr kalt.

3 Methoden

Im Folgenden wird beschrieben, wie die Probenahme im Gelände stattfand, welche Methoden zur Untersuchung der Proben verwendet wurden, wozu diese dienen und wie sie funktionieren.

3.1 Geländearbeit und Probenahme

Die zu untersuchenden Proben wurden im März 2010 durch Kleinrammbohrungen am Fuße des Schwemmfächers in der Polje von Zafarraya genommen (Abb. 7).

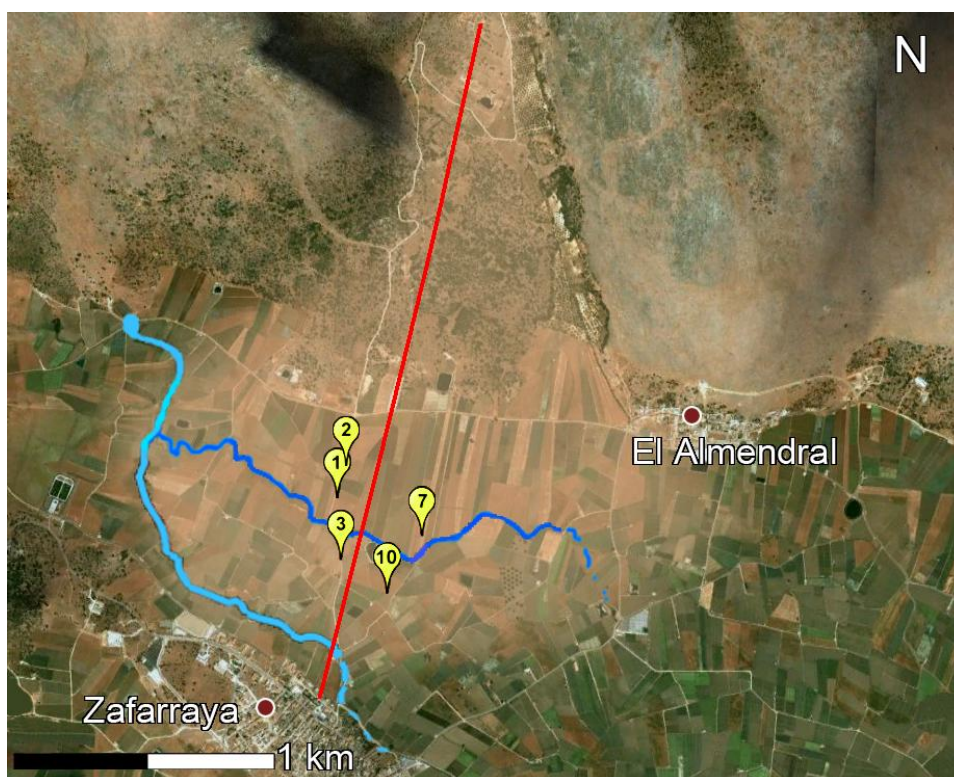


Abb. 7: Lage der Bohrungen am Schwemmfächer vom El Almendral. Die rote Linie markiert das Höhenprofil (Abb. 2), Hellblau markiert den Arroyo de la Madre und Dunkelblau den Entwässerungsgraben entlang des Schwemmfächers (nach Google Earth, 20. Juni 2010)

Die Bohrungen erfolgten mit dem Bohrhämmer Cobra der Firma Atlas Copco, mit dem 1 m lange Schlitzsonden in den Boden geschlagen wurden. In den obersten beiden Metern wurden Sonden mit einem Durchmesser von 60 mm verwendet, darunter 50 mm, um besser in die Tiefe dringen zu können. Weiterhin wurden ein Schlagkopf, Verlängerungsgestänge, ein hydraulisches Ziehgerät, sowie ein Schlüsselsatz benötigt. Endteufe war jeweils der Punkt, an dem aufgrund von starkem Eindringwiderstand, z.B. durch Grobkies, kein Bohrfortschritt mehr

festzustellen war. Bei der Erbohrung von Grundwasser bestand die Gefahr von Kernverlust, da wassergesättigter Boden leicht aus der Sonde fließt. An Bohrpunkt 2 sorgte stehendes Wasser für oberflächennahen Kernverlust, so dass ein Handbohrer vom Typ Edelmann in unmittelbarer Nähe der Kleinrammbohrung eingesetzt wurde, um Proben für das Labor zu gewinnen.

Nach Ziehen der Sonde wurde diese fotografiert (s. Anhang A bis F) und es fand eine Bohrgutansprache nach KEHL (2010) statt, wobei das Bohrgut in Lagen unterteilt wurde. Von jeder Lage wurde im Anschluss eine Probe entnommen, gekennzeichnet und luftdicht verpackt. Die Proben wurden am Ende der Geländekampagne nach Aachen in das Sedimentlabor des Lehr- und Forschungsgebietes für Neotektonik und Georisiken transportiert. Dort wurden die Proben für die weitere Untersuchung getrocknet, zerkleinert, homogenisiert und teilweise gemörsert.

3.2 Bodenfarbe

Anhand der Farbe einer Probe lassen sich Rückschlüsse auf die Art und Menge von Bodenbestandteilen wie Mineralen und Humus ziehen, wodurch sich wiederum Aussagen zur Bodenentwicklung, zu Redoxverhältnissen und ansatzweise auch Klimaverhältnissen machen lassen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002). Somit ist die Farbbestimmung eine schnelle und preisgünstige Methode, Informationen über die Bodenprobe zu gewinnen.

Die Farbensprache für die Proben des Schwemmfächers von El Almendral wurde mithilfe der Farbtafel „Revised standard soil color charts“ (OYAMA & TAKEHARA, 1992) teils bei der Geländeaufnahme und teils nachträglich im Labor gehalten. Da die Farbe bei unterschiedlichen Wassergehalten variiert (je nasser die Probe, desto dunkler die Farbe), wurden alle Farben am feuchten Boden bestimmt.

3.2.1 MUNSELL-Farbtafel

Bei den „Revised standard soil color charts“ handelt es sich um eine Farbtafel basierend auf dem MUNSELL-Farbsystem, welche eine Auswahl an Boden-relevanten Farben beinhaltet. Da die Tafel nur eine Farbauswahl enthält, muss gegebenenfalls zwischen den Farbstufen interpoliert werden. Außerdem sollten gute und gleichbleibende Lichtverhältnisse bei der Bestimmung der Farbe herrschen.

MUNSELL unterteilt die Farben in Farbton (engl.: hue), Intensität (engl.: chroma) und Helligkeit (engl.: value) und erstellt aus diesen drei Komponenten ein dreidimensionales, zylinderförmiges Farbsystem, mit dem sich alle Farben beschreiben lassen (s. Abb. 8).

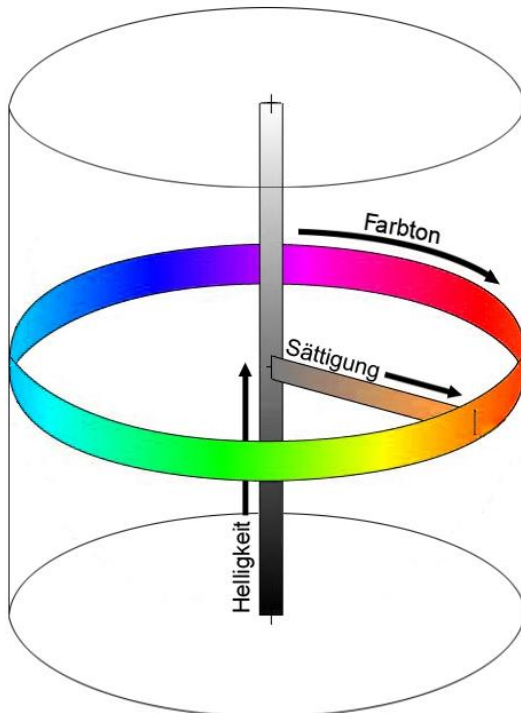


Abb. 8: Schematische Darstellung des Farbsystems nach MUNSELL mit den drei Komponenten Farbton, Sättigung und Helligkeit

Auf der vertikalen Achse ist die Helligkeit aufgetragen von 0 (schwarz) bis 10 (weiß). Ringförmig um die Helligkeitsachse verläuft der Farbton: Die Farben sind im Uhrzeigersinn nach ihrer Wellenlänge von lang nach kurz so angeordnet, dass sich im Kreis jeweils Komplementärfarben gegenüberstehen. Es werden die Bezeichnungen R (engl. Red = rot), Y (engl. Yellow = gelb), G (engl. Green = grün), B (engl. Blue = blau) und P (engl. Purple = violett) verwendet, Farbtöne zwischen R, Y, G, B und P werden als Kombination angegeben (z.B. YR für gelbrot). Weiterhin werden die Hauptfarben und Zwischentöne jeweils mit Zahlen von 0 bis 10 versehen (s. Bild 268), z.B. „5 YR“.

Radial von der Kreismitte nach außen verlaufend ist die Intensität aufgetragen. In der Kreismitte befindet sich die Intensitätsstufe 0 (farblos), außen die höchste Intensität mit Stufe 10 (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002).

5 YR	7/	3
Farbton	Helligkeit	Intensität

Abb. 9: Veranschaulichung eines Farbcodes nach MUNSELL

3.2.2 Alternative Messmethoden

Alternativ zu der auf sinnesphysiologischem Farbeindruck basierenden Ansprache mit der Farbtafel können Farbmessgeräte genutzt werden. Diese arbeiten mit standardisierten Lichtquellen und sind auch im Feld verwendbar.

Die Geräte verwenden andere Farbsysteme (z.B. CIE-L*a*b* oder RGB) und messen stufenlos; es muss also im Gegensatz zu den Farbtafeln nicht zwischen Farbstufen interpoliert werden. Ein weiterer Vorteil der Farbmessgeräte besteht darin, dass das persönliche Farbempfinden und die Lichtverhältnisse am Untersuchungsort die Ergebnisse nicht verfälschen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002), jedoch sind die Anschaffungskosten auch weit höher als die für eine Farbtafel.

3.2.3 Farbgebende Komponenten und Bodenbildungsverhältnisse

Huminstoffe und bestimmte Minerale geben dem Boden charakteristische Farben. Im Folgenden werden die häufigsten und für das Untersuchungsgebiet relevanten Farben beschrieben; für eine tabellarische Übersicht zu Eisenoxiden und Huminstoffen, siehe Anhang G.

Huminstoffe verursachen in erster Linie eine Verringerung der Helligkeit; im Oberboden gilt daher als Faustregel: Je dunkler, desto mehr Huminstoffe. Gelbbraunlicher (ockerfarbener) Boden ist meist durch das Eisenoxid Goethit geprägt. Je größer der Goethitgehalt, desto intensiver ist die Färbung des Bodens, bis bei etwa 150 g pro kg Boden die Farbsättigung erreicht ist (BARRON & TORRENT, 1986). Der Eisengehalt goethitischer Böden kann somit recht genau bestimmt werden, solange sie hämatitfrei sind. Hämatit bewirkt eine sehr intensiv rote Färbung; bereits geringe Hämatitanteile dominieren farblich und geben beispielsweise einem stark goethithaltigen Boden rote Farbtöne. Die Rotfärbung und -intensität des Bodens steigt mit zunehmendem Hämatitgehalt. Bei Bs-Horizonten von Podsolen und in Go-Horizonten von Gleyen ist eine (eher blasse) Orangefärbung auf Ferrihydrit zurückzuführen; intensives Orange dagegen deutet auf lepidokrokithaltige Böden hin (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002).

Die Farbe eines Bodens ist stark von dessen Mineralbestand geprägt und jedes Mineral bildet sich unter spezifischen Redoxbedingungen. Somit kann von der Bodenfarbe auf die Redoxverhältnisse zur Bodenbildungszeit geschlossen werden.

Die Redoxverhältnisse wiederum hängen vom Wasserhaushalt und dem meist daran gekoppelten Sauerstoffvorkommen ab; in wassergesättigtem Porenraum fehlt der Luftsauerstoff und somit sind die Verhältnisse anaerob. Im trockenen Klima herrschen dagegen aerobe Bedingungen.

Gelb-, Braun- und Rottöne zeigen aerobe Böden an, in denen längere Perioden der Wassersättigung fehlen (z.B. hämatithaltige Böden in ausgeprägt wechselfrohem, warmem Klima; goethithaltige Böden auch in gemäßigtem, feuchterem Klima). In roten, hämatitreichen Böden ist zudem kaum organische Substanz zu finden, da diese die Hämatitbildung verzögert (SCHWERTMANN, 1966). Grau-, Blau- und Grüntöne und Schwarz hingegen weisen auf anaerobe Verhältnisse und ständige Wassersättigung des Bodens hin. Örtlich und/oder zeitlich wechselnde Redoxbedingungen (Stauässe, Grundwassereinfluss) werden wiederum häufig durch Eisen- und Manganoxide in Form von Fleckungen und Konkretionen angezeigt (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002).

3.3 Fazies

Die Fazies eines Bodens wird durch die Korngrößenverteilung, Kornform und Petrographie der Körner bestimmt. Aus diesen Merkmalen lassen sich Rückschlüsse auf die Transport- und Ablagerungsbedingungen des Bodens, sowie die Herkunft der Grobfraktion ziehen.

Bei den zu untersuchenden Proben wurde die Fazies teils im Gelände und teils nachträglich im Labor mittels Fingerprobe bestimmt. Zusätzlich erfolgten eine grobe Schätzung des Skelettanteils im Gelände und eine genaue Messung im Labor.

3.3.1 Fingerprobe

Die Bodenproben wurden in feuchtem Zustand mit den Fingern auf Bindigkeit und Formbarkeit (Ausrollen auf halbe Bleistiftstärke) untersucht und nach KEHL (2010) bzw. nach DIN 4022 eingeordnet.

Die Ansprache bei der Fingerprobe kann je nach tonmineralogischer Zusammensetzung beeinflusst werden: Smektitische Tonminerale sind sehr plastisch und Kaolinite kleben stark; der Tongehalt kann somit bei ersteren überschätzt und

bei letzteren unterschätzt werden. Bei höheren Gehalten an organischer Substanz ist die Bestimmung der Bodenart ebenfalls schwierig; die organische Substanz erhöht Bindigkeit und Formbarkeit, daher müssen vor allem Sande je nach Humusgehalt 1 bis 2 Körnungsklassen zurückgestuft werden (KEHL, 2010).

3.3.2 Skelettanteil

Der Skelettanteil (auch Grobfraktion) ist der Anteil von Körnern über 2 mm Korndurchmesser am Gesamtanteil der Probe.

Im Gelände wurde der Flächenanteil des Skeletts nach Augenmaß abgeschätzt, außerdem wurden einzelne Proben aus der Sonde entnommen und händisch auf Skelett untersucht. Hier sei zu beachten, dass die Schätzung nach Augenmaß nur eine sehr grobe Einordnung des Skelettanteils liefert, da die oberflächliche Betrachtung einer Probe nicht repräsentativ ist und möglicherweise Körner übersehen werden. Weiterhin kommt es häufig zu Schätzfehlern bei der prozentuellen Angabe des Skeletts.

Zur gravimetrischen Bestimmung des Skelettanteils im Labor wurden die bereits getrockneten Proben vorsichtig zerkleinert. Die zerkleinerten Proben wurden anschließend mit 2 mm Maschenweite gesiebt und die Fraktionen > 2mm (Skelett) und ≤ 2 mm (Feinboden) getrennt gewogen. Der Skelettanteil berechnet sich über

$$\text{Skelettanteil} = \frac{m_{\text{Skelett}}}{m_{\text{Skelett}} + m_{\text{Feinboden}}} \cdot 100 = \frac{m_{\text{Skelett}}}{m_{\text{gesamt}}} \cdot 100$$

(mit m = Masse) und wird in Prozent angegeben. Das Skelett sämtlicher Proben wurde außerdem nach Korngröße, Farbe und Rundung beschrieben.

Mögliche Fehlerquellen sind hier die Zerstörung von Skelett beim Zerkleinern des trockenen Bodens (so dass dieses fälschlicherweise dem Feinboden zugerechnet wird) und die Anhaftung von Feinboden am Skelett (z.B. in Fissuren oder bei unzureichender Zerkleinerung), was zum einen kleineren Feinboden- und größeren Skelettanteil führt. Letzterer Fehler sollte jedoch in Anbetracht des allgemein geringen Skelettanteils und der Korngrößenbedingt kleinen Oberfläche des Skeletts sehr gering sein.

3.3.3 Alternative Messmethoden

Eine andere Möglichkeit, um im Labor die Korngrößenverteilung zu beschreiben, ist eine kombinierte Sieb- und Schlämmanalyse nach DIN 18 123 (1996). Die nasse Probe wird hier mit destilliertem Wasser über mehrere Maschenweiten gesiebt, die Rückstände der einzelnen Siebe gewogen und in Prozent der Gesamtmasse ermittelt. Die Feinbestandteile des Bodens, die durch alle Siebe gefallen sind, werden aufgeschlämmt, mit Antiflockungsmittel versetzt und anschließend in einem Glaszylinder mit destilliertem Wasser auf 1000 cm³ aufgefüllt. Dann wird ein Aräometer in die Flüssigkeit getaucht und in definierten Zeitintervallen die Absenkung (abhängig von der Korngröße) abgelesen. Aus Absenkung und Wassertemperatur kann die Korngröße bestimmt werden. Sieb- und Schlämmanalysenergebnisse lassen sich dann in einer Kornverteilungskurve darstellen. Die Schlämmanalyse ist jedoch recht zeitaufwendig und dauert pro Durchlauf etwa einen Tag (HAAS, 1997).

3.4 Messung des pH-Wertes

Der Säuregehalt einer Bodenprobe kann helfen, Rückschlüsse über Verwitterung und Bodenbildungsverhältnisse zu gewinnen.

Die pH-Werte wurden an allen Lagen der Bohrkerne 2, 3, 7 und 10 nach der DIN 19684-1 (ersetzt durch DIN ISO 10390: 2005) im Sedimentlabor des Lehrstuhls für Neotektonik und Georisiken der RWTH Aachen untersucht.

Der pH-Wert der Proben wurde potenziometrisch mit dem Gerät pH DIGI 550 der Firma WTW bestimmt. Hierfür wurden je 10 g des getrockneten Feinbodens in einem Schnappdeckelglas mit 25 mL deionisiertem Wasser versetzt, gut durchmischt und zwei Stunden stehen gelassen, wobei gelegentlich gerührt wurde. Nach zwei Stunden wurde die Glaselektrode des zuvor kalibrierten Potenziometers in die Suspension getaucht und der pH-Wert gemessen.

Anschließend wurde die Probe mittels Filterpapier gefiltert und eine weitere pH-Messung im Filtrat vorgenommen, welche jedoch nur dazu diente, die Tendenz der zuvor gemessenen Werte zu verifizieren und mögliche Messfehler zu erkennen. Für die Auswertung der Bodensäure wurden die pH-Werte aus dem Filtrat jedoch nicht verwendet.

Das Messprinzip beruht auf den Gesetzen der Galvanik und der NERNST-Gleichung. Vereinfacht erfolgt die pH-Messung folgendermaßen: Die Messelektrode des Potenziometers (s. Anhang H) wird zunächst kalibriert; nachdem Temperatur, Asymmetrie und Steilheit eingestellt sind, wird sie in die Messlösung getaucht. Die Innenlösung (KCl-Lösung) hat nun über die Glasmembran Kontakt zur Messlösung. Wenn sich die H^+ -Ionenkonzentration von Innen- und Messlösung voneinander unterscheiden, entsteht an der Membran eine zur H^+ -Ionenkonzentration der Messlösung proportionale elektrische Spannung. Von der Spannung kann direkt auf den pH-Wert geschlossen werden.

Es sollte beachtet werden, dass beim Kontakt des Bodens mit deionisiertem Wasser chemische Reaktionen ablaufen können, die zu einem leicht erhöhten pH-Wert führen. Alternativ zu reinem Wasser kann daher Salzlösung (0,01 molares Calciumchlorid oder 1 molares Kaliumchlorid) verwendet werden. Bei Salzlösungen findet ein Austausch von Kationen gegen H^+ -Ionen statt, daher liegt der pH-Wert niedriger als bei Messungen mit reinem Wasser. Ein Teil der an den Kationenaustauschern gebundenen H^+ -Ionen wird somit erfasst; diese Methode kommt den Vorgängen im Boden etwas näher (SCHLICHTING et al., 1995).

Weiterhin soll angemerkt werden, dass sich der pH-Wert bei vollständigem Trocknen des Feinbodens irreversibel verändern kann (SCHLICHTING et al., 1995). Außerdem wurde bei der Untersuchung die chemische Wirkung der Grobfraktion (Skelett) nicht berücksichtigt; Untersuchungen von MARTÍN-GARCÍA et al. (1999) an skelettreichen mediterranen Roterden ergaben jedoch, dass die Grobfraktion einen bedeutenden Einfluss auf die chemischen Eigenschaften des Bodens hat.

3.5 Messung der elektrischen Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit (auch Konduktivität) einer Bodenlösung ist ein indirektes Maß für den Salzgehalt des Bodens. Durch Sickerwasser können die Salze leicht aus dem Boden geschwemmt werden; in solchen Fällen weist die betroffene Bodenschicht eine geringe Leitfähigkeit auf. Die Leitfähigkeit kann also

herangezogen werden, um Rückschlüsse auf Wasserhaushalt und somit indirekt auf Witterungsverhältnisse zur Bodenbildungszeit zu ziehen.

Leitfähigkeitswerte wurden, wie der pH-Wert, an den Bohrkernen 2, 3, 7 und 10 im Sedimentlabor des Lehr- und Forschungsgebietes für Neotektonik und Georisiken der RWTH Aachen bestimmt.

Die Vorbereitung der Proben erfolgte wie bei der pH-Analyse; in das Filtrat der Probe wurde die Elektrode des zuvor kalibrierten Messgerätes (Conductometer LF 191 der Firma WTW) getaucht. Das Leitfähigkeitsmessgerät misst den spezifischen elektrischen Widerstand, welcher den Kehrwert zur elektrischen Leitfähigkeit darstellt. Die Leitfähigkeit wird in mS/cm abgelesen.

3.6 CN-Analyse

Um Informationen über Umwandlung organischer Bestandteile (Humus) im Boden zu gewinnen, werden die in der Organik gebundenen Elemente Kohlenstoff und Stickstoff untersucht: Über den Anteil an Kohlenstoff und das Verhältnis zu Stickstoff können Bodenbildungsphasen bedingt rekonstruiert und ehemalige Geländeoberkanten identifiziert werden.

Wie viel organischer Kohlenstoff (C_{org}) im Boden zu finden ist, hängt von einer Reihe verschiedener Faktoren ab: Menge des verfügbaren organischen Materials (also z.B. Vegetationsdichte), Klimabedingungen, Sedimentationsrate und Alter des Bodens.

Die Verfügbarkeit organischen Materials gibt vor, wie viel Material überhaupt in den Boden eingetragen werden kann und das Klima hat Einfluss darauf, wie viel von dem Material zu Humus umgesetzt wird. Bei geringer Sedimentationsrate liegt der Humus an der Bodenoberfläche lange frei exponiert und wird durch mikrobielle Prozesse in Kohlenstoffdioxid (CO_2) umgewandelt, welches in die Atmosphäre entweicht. Bei hoher Sedimentationsrate dagegen wird der Humus schnell überdeckt und der Kohlenstoff nur noch viel langsamer zu CO_2 umgewandelt. Im Laufe der Zeit wird jedoch auch C_{org} im Boden langsam zu CO_2 umgewandelt, d.h. je älter der Boden ist, desto stärker hat meist auch der C_{org} -Anteil abgenommen. Abbildung 10 stellt anschaulich den Einfluss dieser Faktoren auf den letztendlich gemessenen Kohlenstoffgehalt dar.

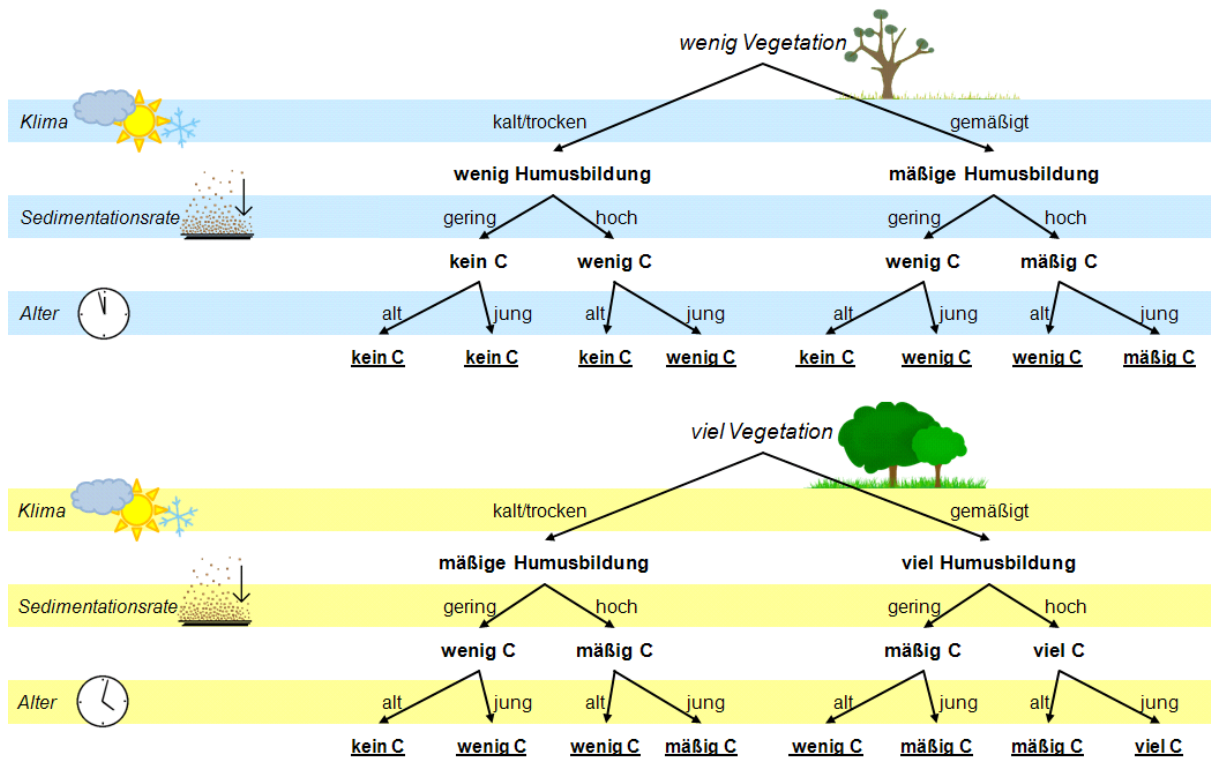


Abb. 10: Schematische Darstellung der Einflussfaktoren Verfügbarkeit organischen Materials, Klima, Sedimentationsrate und Alter und deren Auswirkung auf den organischen Kohlenstoffgehalt (hier „C“) im Boden

Entsprechend werden häufig die Verhältnisse von organischem Kohlenstoff zu Stickstoff (C/N) zur Beurteilung von (abiotischen und biotischen) Bodenbildungsverhältnissen herangezogen. Enge C/N-Verhältnisse (also kleine Quotienten) gelten hierbei als Indikator für ungehemmte Umsetzung, weite Verhältnisse dagegen zeigen gehemmte Umsetzung an.

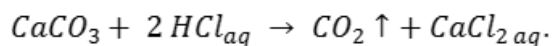
Problematisch hierbei ist jedoch, dass die C/N-Verhältnisse abhängig sind von dem Diagenese-Grad und der Quelle des organischen Materials (GRAHAM et al., 2001), d.h. nicht jede Humusschicht bringt gleiche organische C/N-Verhältnisse in den Boden ein. Zudem führen sehr niedrige Stickstoffanteile zu sehr hohen C/N-Werten; wenn der Stickstoffgehalt unter die Nachweisgrenze fällt, wird durch Null geteilt.

Für die Kohlenstoffanalyse wurden die Bodenproben zunächst mittels HCl-Schnelltest auf anorganischen Kohlenstoff (Carbonate) untersucht. Der Test verlief bei sämtlichen Proben bis auf die unterste Lage von Bohrkern 2 negativ, so dass auf die quantitative Bestimmung/Zerstörung von anorganischem Kohlenstoff verzichtet wurde.

Anschließend wurden die Proben im Physisch-Geographischen Labor des Geographischen Instituts der Universität zu Köln mithilfe eines CN-Analysators quantitativ auf Gesamt-Kohlenstoff (C) und Stickstoff (N) untersucht. Da bis auf besagte Probe von Bohrkern 2 kein anorganischer Kohlenstoff festgestellt werden konnte, kann der gemessene Gesamt-Kohlenstoffgehalt für organisch erklärt werden. Im Folgenden werden die Untersuchungsschritte genauer erklärt:

3.6.1 HCl-Schnelltest

Anorganischer Kohlenstoff ist in Böden meist als Carbonat (MeCO_3) gebunden. Um zu testen, ob Carbonat enthalten ist, wird zehnpromzentige Salzsäure auf die getrocknete, feingemörserte und homogenisierte Probe getropft und beobachtet, ob sich Blasen bilden und somit Gas entsteht. Die Reaktion von Calciumcarbonat mit Salzsäure läuft folgendermaßen ab:



Bei dem entstehenden Gas handelt es sich also um Kohlenstoffdioxid (CO_2). Das Gas verflüchtigt sich beim HCl-Schnelltest; es kann nur zwischen schwachem, mäßigem und starkem Aufbrausen unterschieden werden. Somit kann nur qualitativ bestimmt werden, ob Carbonat enthalten ist.

Hierbei soll angemerkt sein, dass Carbonate unterschiedlich schnell mit kalter Salzsäure (HCl_{aq}) reagieren; reiner Kalk(-stein), also Calciumcarbonat (CaCO_3), reagiert rasch und heftig, während Dolomit langsamer reagiert und die Reaktion anderer Carbonate wie Ankerit und Siderit auch nach dreißig Minuten noch nicht abgeschlossen ist (HILTMANN & STRIBRNY, 1998). Langsam reagierende Carbonate können mithilfe des HCl-Schnelltests kaum oder gar nicht identifiziert werden.

Um quantitativ den anorganischen Kohlenstoffgehalt zu ermitteln, kann beispielsweise ein SCHEIBLER-Gerät nach der DIN 18129 eingesetzt werden. Für den Versuchsaufbau nach SCHEIBLER wird die gemörserte Probe in einem verschlossenen Gefäß mit Salzsäure versetzt; es läuft die gleiche Reaktion ab wie beim HCl-Schnelltest. Das entstehende Kohlenstoffdioxid verdrängt ein bestimmtes Volumen an Wasser in einer angeschlossenen Messsäule. Anhand des verdrängten Volumens und unter Berücksichtigung der Temperatur lässt sich nun der Carbonatgehalt berechnen.

Sofern das Carbonat als Calcit vorliegt, liefert das SCHEIBLER-Verfahren rasch sehr genaue quantitative Werte. Falls es sich jedoch um schwerlöslichere Carbonate handelt, so muss eine lange Reaktionszeit eingeplant werden oder die Ergebnisse werden verfälscht (HILTMANN & STRIBRNY, 1998).

3.6.2 CN-Elementaranalysator

Die Gesamtgehalte an Kohlenstoff und Stickstoff wurde mit dem Elementaranalysator vario EL CN der Firma Elementar bestimmt, welcher vollautomatisch und quantitativ die Elemente C und N untersucht. Das Gerät arbeitet mit einer Verbrennungsmethode; die Probe wird erst oxidiert, dann reduziert und die einzelnen Messkomponenten werden letztendlich mittels Wärmeleitfähigkeitsdetektor (WLD) quantifiziert. Als Trägergas wird Helium in der Reinheit von 99,996 % verwendet, weiteres Versorgungsgas ist Sauerstoff mit der Reinheit von 99,995 %. Vor Beginn der eigentlichen Messungen wird das Gerät mit Blind- und Eichproben (Acetanilid C_8H_9NO) gereinigt.

Zur Vorbereitung für die Analyse wurden die Bodenproben fein gemörsert und jeweils etwa 40 mg Probe in einen tarierten Zinntiegel überführt. Die Tiegel wurden durch spezielle Falltechnik verschlossen und in den Probeteller des Analysators eingesetzt. Um größere Messsicherheit zu erzielen, wurden aus jeder Lage zwei Proben gemessen. Im Folgenden wird schematisch der Analysevorgang erklärt:

Schritt 1: Oxidation

Zu Beginn der Analyse fällt eine Probe aus dem automatischen Probengeber in das etwa 1020 °C heiße Verbrennungsrohr, wo sie unter Sauerstoffzufuhr verbrannt wird. Es entstehen die Gase CO_2 , NO_x und H_2O , welche im Trägergasstrom über eine als Katalysator dienende Dichromtrioxid- und Kupferoxidschicht weitergeleitet werden.

Schritt 2: Reduktion

Die Verbrennungsgase durchfließen nun im Reduktionsrohr eine Schicht mit Kupferspänen, an der NO_x bei etwa 650 °C zu elementarem Stickstoff (N_2) reduziert wird.

Schritt 3: Trennung der Messkomponenten

Der noch enthaltene Wasserdampf wird mittels Magnesiumperchlorat entzogen; es verbleibt somit nur noch das untersuchungsrelevante Gas. Um die einzelnen

Gaskomponenten getrennt in den WLD zu überführen (welcher nicht spezifisch zwischen ihnen unterscheiden kann), werden sie über Trennsäulen (Ad- und Desorptionssäulen) separiert und anschließend getrennt im WLD gemessen.

Schritt 4: Wärmeleitfähigkeitsdetektor

Der WLD besteht aus zwei Messzellen: In eine wird das zu untersuchende Gas mithilfe des Trägergases gespült, in die zweite Zelle, Referenzzelle, wird reines Trägergas gespült. Die beiden Messzellen bilden eine Messbrücke.

Während der Analyse wird die Zeit gemessen; über die Flächen der Messpeaks (über die Zeit integriert) gibt sich die quantitative Stoffmenge, welche mithilfe der bekannten Probenmasse als Massenanteil in Prozent angegeben werden kann.

4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen von Bodenfarbe, Fazies, pH und Leitfähigkeit, sowie CN-Analyse vorgestellt. Bei Bohrung 7 gab es bei fast allen Bohrmeter jeweils einen Überstand des Bohrkernes (s. Anhang D und E). Dies ist darauf zurückzuführen, dass auf den Bodenschichten in größerer Tiefe viel Gewicht lastet, welches sie komprimiert; beim Ziehen des Kernes dehnt sich der Boden infolge der Entlastung wieder aus. Daher wurden neue Schichtuntergrenzen für Bohrung 7 berechnet, indem die Lagen mit Überstand und die darüber liegenden gestaucht wurden.

Auf der nächsten Seite wird beispielhaft das Profil von Bohrung 2 dargestellt. Die Doppelseite vor dem Hefrücken zeigt eine Übersicht über alle Bohrprofile. Für die detaillierte Ansicht im Maßstab 1:10, siehe Anlagen-CD. Auf Einfügen der Bohrkernfotos in die Profile wurde aufgrund der Überstände, vor allem aber auch der sehr geringen Bildgröße und somit geringen Erkennbarkeit innerhalb des Profils verzichtet. Ebenso wurden keine elektrischen Leitfähigkeiten in die Profile eingetragen, da die Schwankungen hier nur sehr geringfügig waren.

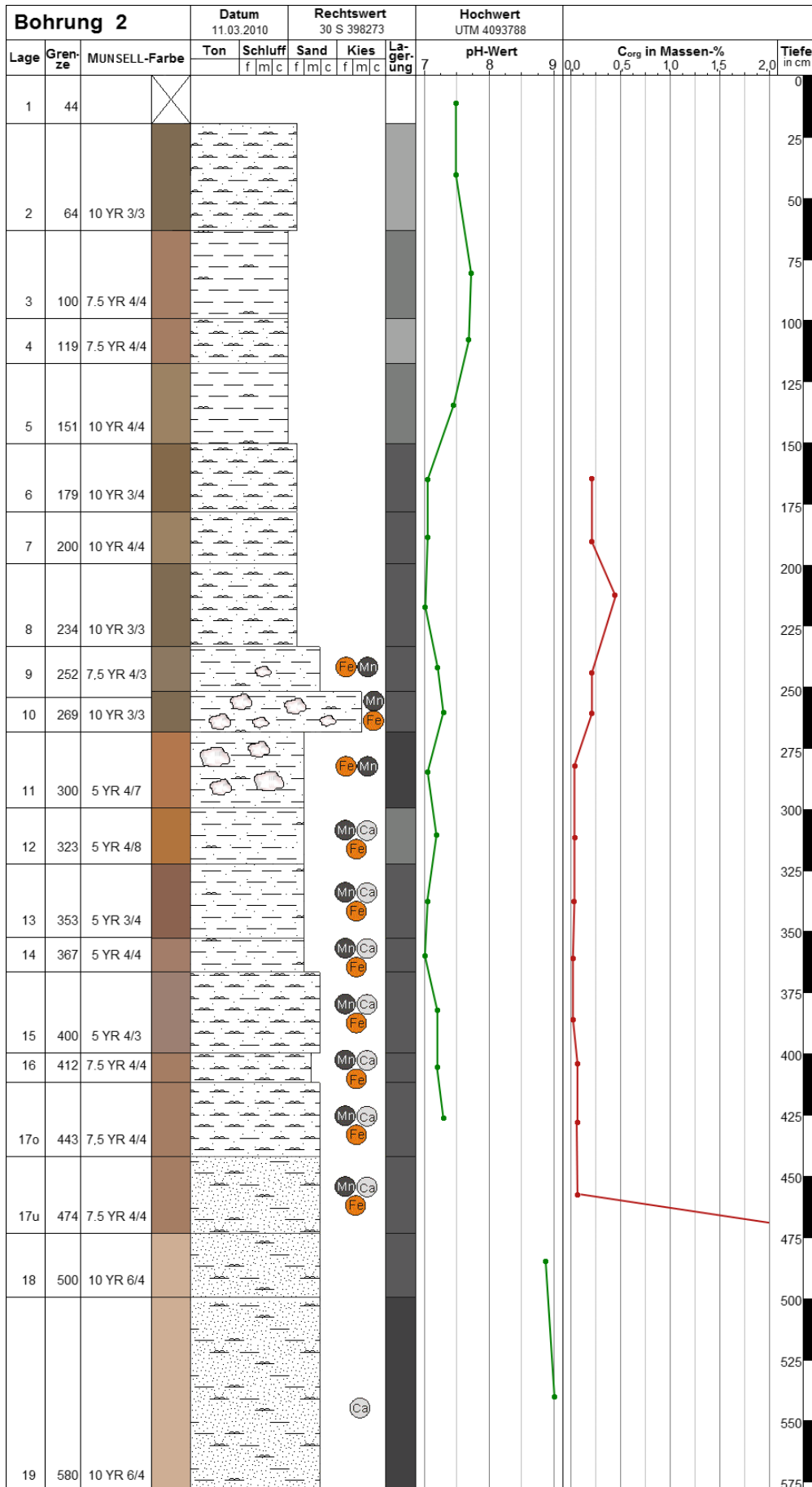


Abb. 11: Profil der Bohrung 2

4.1 Bodenfarbe

Die Bodenfarbe in den Bohrungen 1, 2, 3, 7 und 10 reicht von dunklem Braun (vor allem in den oberen Lagen) über blasserer Graubraun und sehr helle Rottöne bis zu intensivem Orange. Es folgt eine Abhandlung der Farben für jeden der Bohrkern.

Bei Bohrkern 1 erstreckt sich die mittel- bis dunkelbraune Farbe bis in etwa 3 m Tiefe, wo sie allmählich in wärmere Orangetöne übergeht. In einem breiten Bereich um die Tiefe von 1 m befinden sich ausgebleichten graubraune Lagen; eine weitere taucht bei ca. 4,50 m unter der Geländeoberkante (GOK) auf. In dem Bereich von 5,50 m bis kurz vor der Endteufe in 7 m Tiefe liegen zudem sehr hellrote (rosafarbene) Lagen.

Bohrkern 2 weist etwas kühlere Braun- und Graubrauntöne auf, die teils einen leichten Violettschich haben; bei knapp 2 m und um 2,5 m herum sind die Farben etwas ausgebleicht. Auffällig ist ein intensiv orangeroter Bereich in 3 m Tiefe. Ähnlich wie bei Bohrung 1, treten in größerer Tiefe rosafarbene Schichten auf, bei Bohrkern 2 jedoch schon ab knapp 5 m Tiefe bis zur Endteufe bei fast 6 m.

Bohrkern 3 weist ausschließlich kühlere Brauntöne auf, welche zudem an vielen Stellen blasser sind als in den anderen Bohrkernen, so z.B. von etwa 1 bis 2 m und von 2,4 m bis in über 3 m Tiefe. Ab 4 m unter GOK bis zur Endteufe bei 9 m gibt es schnelle Wechsel zwischen sehr hellen Graubrauntönen und dunklerem Braun.

Bohrkern 7 zeigt bis zu einer Tiefe von 7 m unter GOK einen sehr homogenen, etwas kühlen Brauntönen. Kräftiger ist das Braun in zwei schmalen Lagen bei etwa 4,6 m und 5,1 m. Ab einer Tiefe von 7 m werden die Brauntöne warm, das heißt zunehmend rötlicher, um bei knapp 8 m von einem hellen Orange abgelöst zu werden, welches sich bis zur Endteufe von knapp 11 m durchzieht und nur in den letzten beiden Lagen etwas dunkler und gräulicher wird.

Die Lagen von Bohrkern 10 sind durchgehend von kühl-brauner Farbe und etwas weniger intensiv als Bohrkern 1 und 2. Die oberste Bodenschicht von 0 bis etwa

30 cm und die Schicht von 1,0 m bis 1,3 m unter GOK sind dunkler als die anderen Schichten, ansonsten weist der Bohrkern jedoch keine Auffälligkeiten auf.

4.2 Fazies

Die untersuchten Bohrkern 1, 2, 3, 7 und 10 zeigen fast ausschließlich Lehme auf, also Mischungen aus den Korngrößenfraktionen Ton, Schluff und Sand, wobei deren Mengenanteile variieren. Sehr bindige tonige Lehme dominieren, vereinzelt treten auch reine Tonschichten auf.

Die Grobfraktion (Skelett) kommt meist nur als kleine Beimengung vor und besteht, sofern nicht gesondert erwähnt, aus silikatischem Material in verschiedenen Farben.

Die Rundung aller Körner ist durchgehend leicht kantig bis überwiegend scharfkantig und wird allgemein als grusig bezeichnet. Für die Darstellung von Bodenart und markantestem Skelett, siehe Bohrprofile. Die Beschreibung der Bohrkern erfolgt in der Reihenfolge ihrer Höhenlage am Schwemmfächer (von oben nach unten).

Abbildung 12 zeigt alle Skelettanteile der Bohrungen 1, 2, 3, 7 und 10, wobei die Angaben zu Bohrungen 1, 3 und 10 nur grob den im Feld gemessenen Flächenanteil des Skeletts wiedergeben. Bei diesen Bohrkernen wird also nur der Trend der Skelettverteilung dargestellt. Für die Tiefe wurde die Untergrenze der jeweiligen Schicht verwendet.

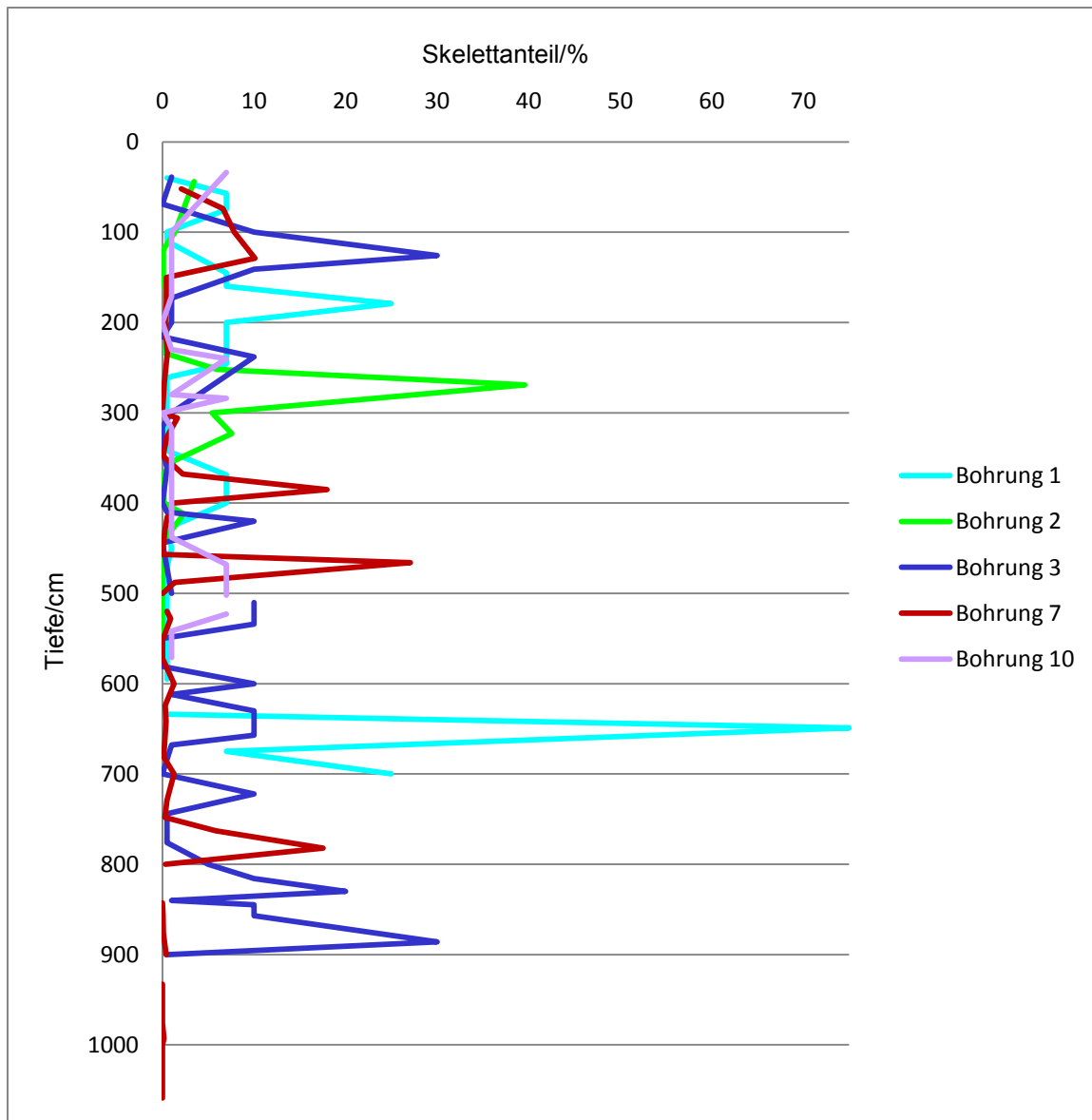


Abb. 12: Skelettanteile der Bohrung 1, 2, 3, 7 und 10. Für die Bohrungen 2 und 7 wurden die gravimetrisch bestimmten Anteile aufgetragen, für die übrigen Bohrungen näherungsweise der flächenbezogene Anteil.

Auch bei Bohrung 2 nimmt der Anteil an gröberen Bodenfraktionen mit der Tiefe zu; oberflächennah dominieren schluffige Lehme und Tonschichten, während sie, wie bei Bohrung 1, ab ca. 4,50 m unter GOK sehr sandig werden. Der Skelettanteil variiert stark: In den oberen 2,5 m beläuft er sich auf 0 bis 6 %, bei 2,7 m gibt es einen großen Sprung auf 40 %. Der hohe Wert kommt durch Körner von 30 bis 50 mm Durchmesser (nach DIN 4022 also Grobkies) zustande, welche sich von dem restlichen silikatischen Material abgrenzen und von hartweißer Farbe sind.

Ein Exemplar wurde zur näheren Untersuchung aufgeschlagen und im Kern silikatisches Material gefunden. Die ummantelnde Schicht, im Folgenden Halo

genannt, hat eine MOHS-Härte von 1 bis 2 und reagiert nicht auf den Salzsäure-Schnelltest.

Auf den nächsten 2 m fällt der Skelettanteil wieder allmählich ab, wobei das Halo-Material in kleinen Körnern (aber ohne silikatischen Kern) weiter auftritt.

Bei Bohrung 1 bestehen die oberen Lagen hauptsächlich aus tonigem Lehm; bis zur Endteufe nimmt der Anteil an den gröberen Fraktionen Schluff und Sand jedoch stetig zu, so dass der Boden ab einer Tiefe von 4,50 m als sandiger Lehm anzusprechen ist. In den oberen 1,5 m und bei 3 m sind Tonlagen eingeschaltet. Der Skelettanteil (hier: Flächen-%) im Kern ist mit 1 bis 10 % recht niedrig, erreicht aber bei 1,80 m Tiefe und in der Endteufe von 7,00 m bis zu 30 %.

Bohrkern 7 besteht überwiegend aus tonigem Lehm. Ausnahmen bilden die Tonschicht (1,5 m bis 3,0 m unter GOK) und der sandige Ton ab 8,20 m bis zur Endteufe. Der Kern enthält sehr geringe Mengen an Skelett (durchschnittlich 0 bis 1 %), welches ausschließlich silikatisch ist und warme Rot- und Ockertöne aufweist. Zwischen etwa 3,7 m und 3,9 m ist eine Lage mit 18 % Skelett zu finden; die beiden benachbarten Lagen weisen dagegen nur gering erhöhte Werte von 1 bis 2 % auf. Eine weitere, sehr scharf abgetrennte, skelettreiche Schicht (27 %) liegt zwischen 4,57 m und 4,66 m unter GOK. In dem Bereich zwischen 7 und 8 m Tiefe befinden sich neben silikatischem Material kleine Mengen des hartweißen, in Bohrung 2 bereits beschriebenen, Halos. Bei etwa 7,5 m überschreitet zudem der Skelettanteil 5 % und steigt bis knapp 7,9 m auf 18 %, fällt danach aber sofort wieder auf unter 1 % ab.

Für Bohrung 3 wurde das Skelett nur im Gelände bestimmt. Der Flächenanteil variiert; in den meisten Schichten kommt nur wenig Skelett (um 1 Flächen-%) vor, jedoch gibt es auch Schichten mit bis zu 30 % (in etwa 1 m, 8 m und 9 m Tiefe) und ebenso skelettfreie Bereiche (vor allem um 3 m und bei knapp 6 m Tiefe).

Das Skelett von Bohrkern 10 beträgt 1 bis maximal 10 Flächen-%, nur die Lagen bei 2 und 3 m Tiefe sind vollkommen skelettfrei. Bei der Grobfraktion handelt es sich ausschließlich um silikatisches, kantengerundetes bis kantiges Material in warmen Farbtönen.

Auffällig ist, dass das Skelett bis auf die hartweißen Klasten überall warme Farbtöne (Rot-, Gelb- und Ockertöne) zeigt.

4.3 pH-Werte

Die pH-Werte sämtlicher Bohrkerns liegen im Bereich zwischen 7,0 und 9,0 und sind nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002) als neutral bis mäßig alkalisch einzustufen.

Bei den Bohrungen 2, 3 und 7 konnte vereinzelt kein pH-Wert bestimmt werden, da die Probe durch Haarrisse im Glasbehälter ausgetreten war oder nicht genügend Feinboden für die Untersuchung zur Verfügung stand. Gleiche Probleme traten infolge auch für die Leitfähigkeitsmessungen (Kapitel 4.4) auf.

Im Folgenden werden die Messergebnisse an den einzelnen Bohrungen in der Reihenfolge analog zur Fazies vorgestellt. Bei der Darstellung der pH-Diagramme wurden geglättete Verbindungslinien gewählt, da im Boden nicht von harten Übergängen zwischen den pH-Werten auszugehen ist. Für die Tiefe wurde jeweils die Untergrenze der einzelnen Lagen unter GOK eingetragen.

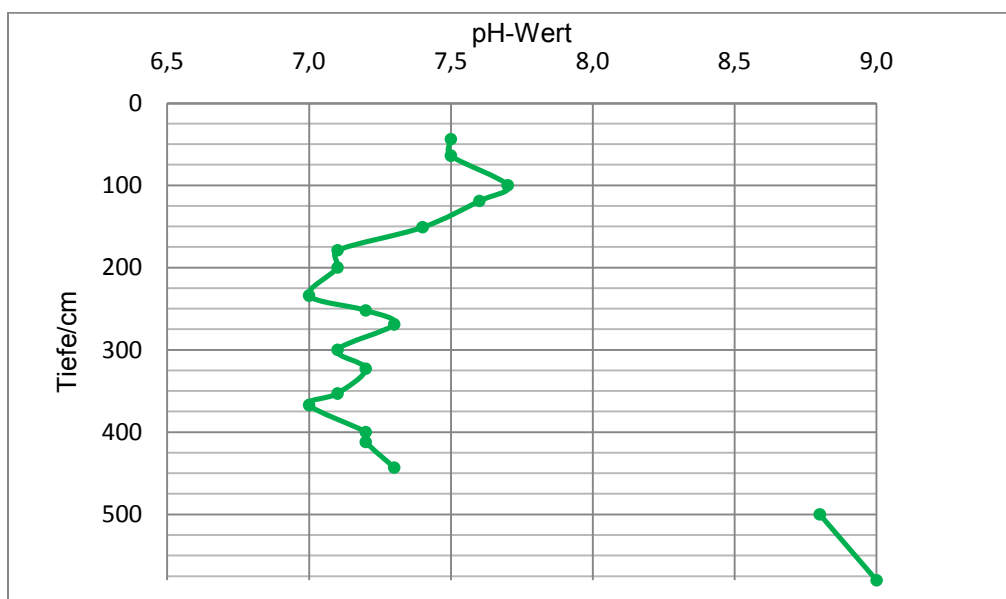


Abb. 13: pH-Werte (in Suspension gemessen) von Bohrung 2

Die am höchsten am Schwemmfächer gelegene Bohrung 2 hat nahe der GOK einen pH von 7,5, der bei 1 m Tiefe etwas steigt und dann bis zu einer Tiefe von gut 4 m zwischen 7,0 und 7,2 schwankt. Bei etwa 5 m Tiefe steigt der pH sprunghaft auf 8,8 bis 9,0 an.

Der pH-Wert der etwas tiefer gelegenen Bohrung 7 (s. Anhang K) hat eine mit der Tiefe sinkende Tendenz von etwa 8,2 nahe der GOK bis zu 7,0 in knapp 11 m Tiefe. Bei ca. 5 m Tiefe weist das Bohrgut jedoch einen leicht erhöhten pH-Wert von 8,3 auf.

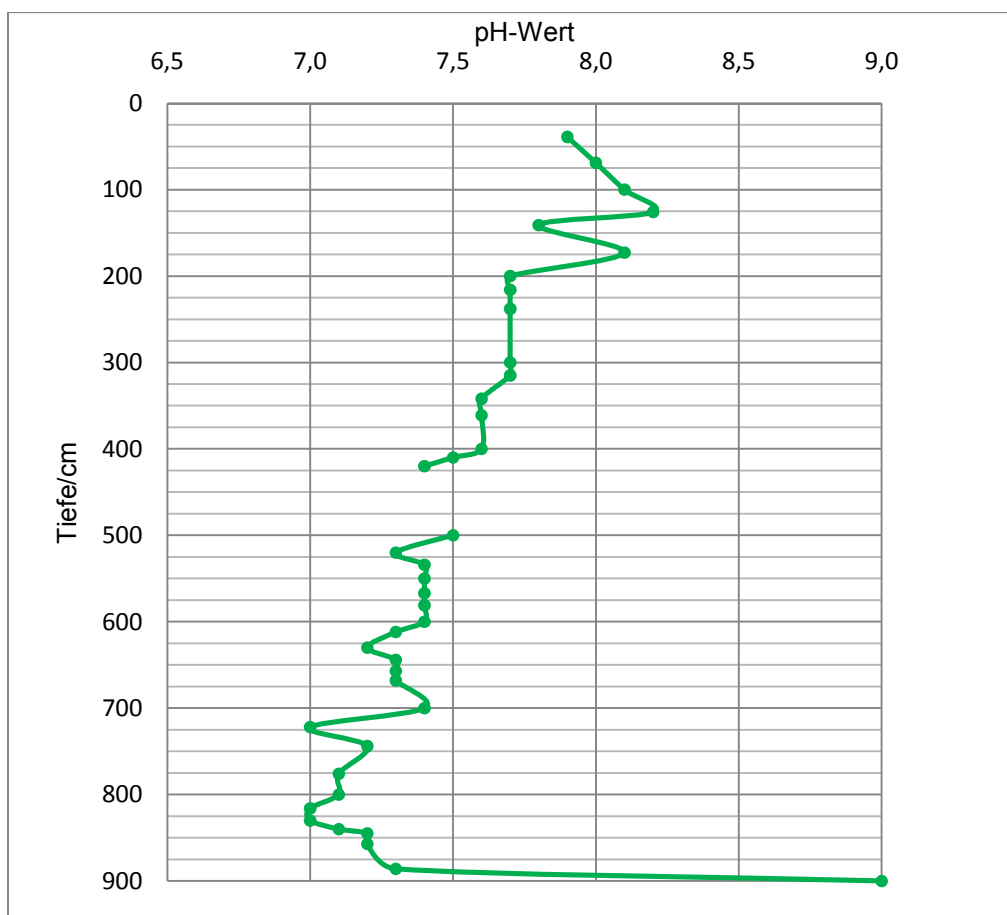


Abb. 14: pH-Werte (in Suspension gemessen) von Bohrung 3

Bohrungen 3 und 10 liegen am tiefsten, beide unterhalb des Entwässerungsgrabens. Der pH-Wert von Bohrung 3 liegt oberflächennah bei knapp 8, steigt bei 1 m Tiefe auf 8,3 und sinkt dann recht kontinuierlich auf pH 7 in gut 8 m Tiefe. Ab 8,3 m unter GOK beginnt der pH wieder leicht zu steigen und macht schließlich in der untersten Lage bei 9 m Endteufe einen immensen Sprung auf pH 9.

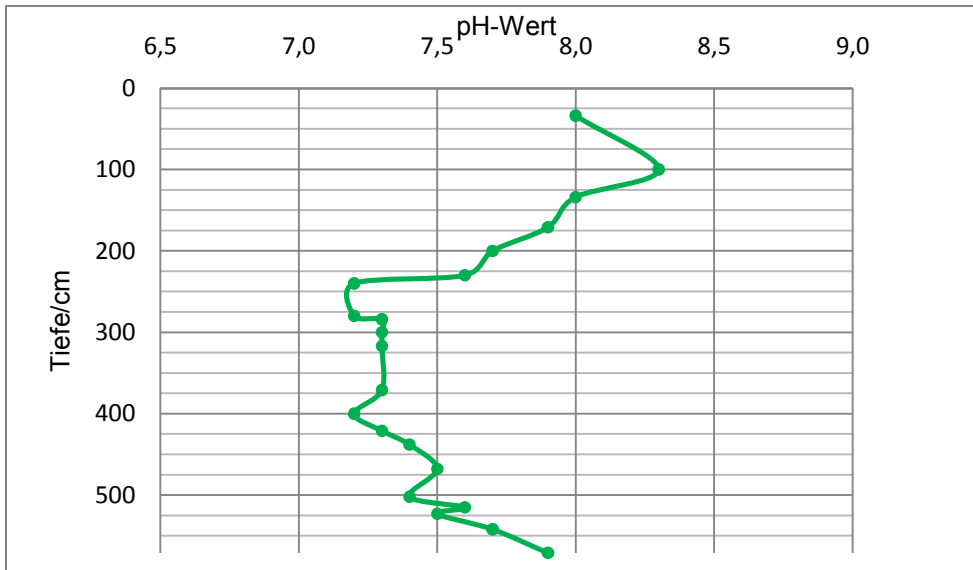


Abb. 15: pH-Werte (in Suspension gemessen) von Bohrung 10

Oberflächennah hat Bohrung 10, ähnlich wie Bohrung 3, einen pH von 8,0, der bei 1 m Tiefe auf 8,3 steigt und dann kontinuierlich fällt, so dass er bei 3 m Tiefe etwa 7,2 beträgt. Danach steigt der pH wieder allmählich an und erreicht bei der Endteufe von knapp 6 m einen Wert von 7,9.

Auffällig bei allen vier Bohrungen ist der leichte pH-Anstieg bei etwa 1 m Tiefe. Bohrung 3 ist zudem die einzige, bei der kein signifikanter pH-Anstieg in Bereich von 5 m Tiefe festzustellen war. Hier sei jedoch zu beachten, dass die Lagen unmittelbar darüber nicht beprobt wurden.

4.4 Elektrische Leitfähigkeit

Die gemessene elektrische Leitfähigkeit in den Bohrkernen 2, 3, 7 und 10 liegt zwischen 0,11 mS/cm als tiefstem Wert und 1,5 mS/cm als höchstem Wert. Im Folgenden werden die Messergebnisse in der Reihenfolge analog zur Fazies und pH-Messung vorgestellt. Auch hier wurden bei der grafischen Darstellung geglättete Verbindungslinien gewählt und die Schichtuntergrenzen als Tiefe verwendet.

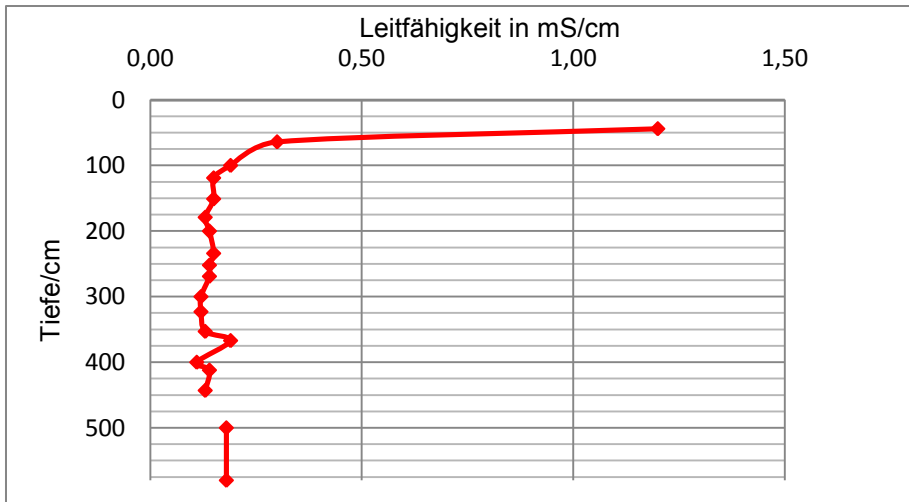


Abb. 16: Werte der elektrischen Leitfähigkeit (in mS/cm) von Bohrung 2

Bei Bohrkern 2 hat die oberste Lage eine vergleichsweise hohe Leitfähigkeit von 1,20 mS/cm. Diese sinkt jedoch schon in der zweiten Lage rasch auf 0,30 mS/cm, pendelt sich dann auf etwa 0,14 mS/cm ein und steigt erst wieder in 5 m Tiefe leicht auf 0,18 mS/cm an. Einzige Ausnahme bildet ein Peak bei knapp 7 m Tiefe; hier beträgt die Leitfähigkeit 1,9 mS/cm.

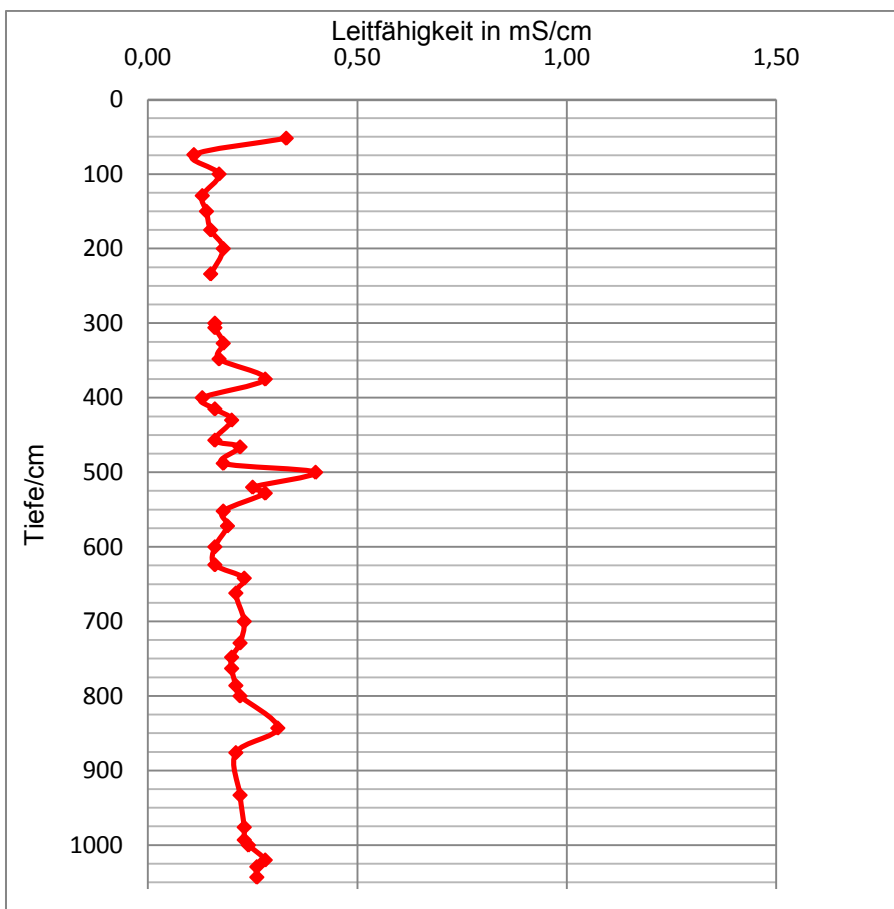


Abb. 17: Werte der elektrischen Leitfähigkeit (in mS/cm) von Bohrung 7

Auch Bohrkern 7 weist in der obersten Lage eine – jedoch nur geringfügig – erhöhte Leitfähigkeit von 3,30 mS/cm auf. Danach bewegen sich die Werte um etwa 0,15 mS/cm und steigen mit der Tiefe leicht an auf durchschnittlich 0,26 mS/cm in 10 m unter GOK. Bei ca. 4 m, 5 m und 8,5 m unter GOK springt die Leitfähigkeit jedoch auf jeweils 0,28 mS/cm, 0,4 mS/cm und 0,31 mS/cm.

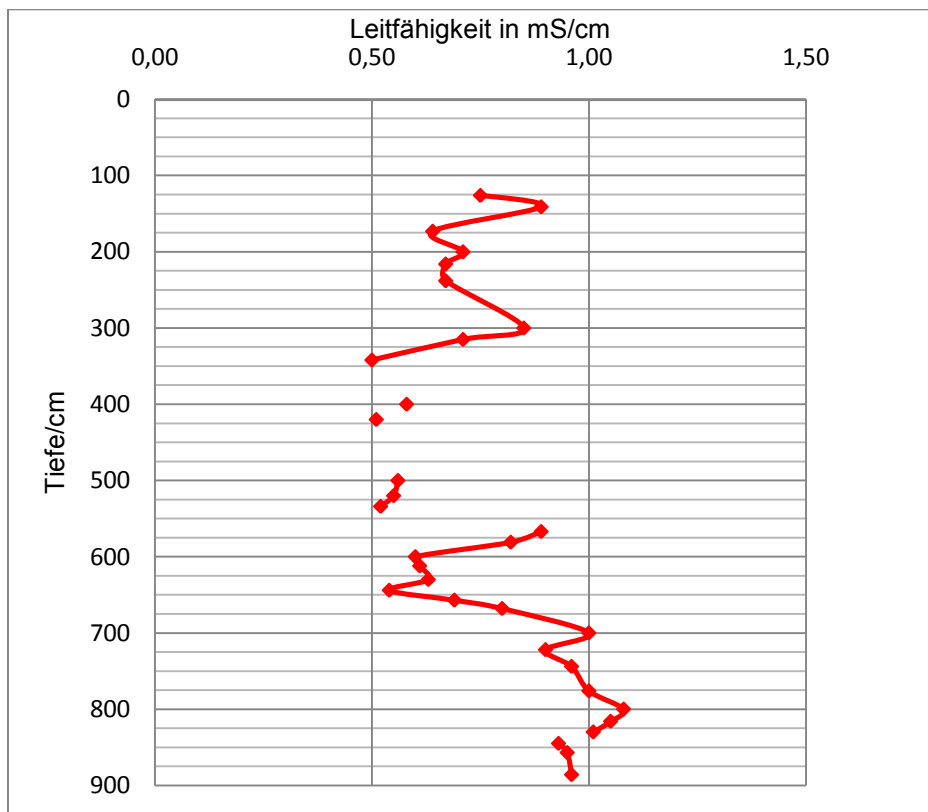


Abb. 18: Werte der elektrischen Leitfähigkeit (in mS/cm) von Bohrung 3

Wie in Kapitel 4.3 bereits vermerkt, konnten keine Werte für die oberen Lagen von Bohrkern 3 bestimmt werden. Die Werte ab 1 m Tiefe schwanken recht stark, liegen jedoch alle im Bereich zwischen 0,5 und 1,0 mS/cm, was deutlich höher ist als bei den anderen Bohrkernen; bei 8 m Tiefe erreicht die Leitfähigkeit auf 1,08 mS/cm.

Die elektrischen Leitfähigkeiten von Bohrung 10 (s. Anhang L) ähneln denen von Bohrung 2 stark; auch hier gibt es in der oberen Lage eine vergleichsweise sehr hohe Leitfähigkeit von 1,5 mS/cm. Danach fallen die Werte wieder auf durchschnittlich 0,18 mS/cm und nehmen in der Tiefe minimal zu. Wie auch bei Bohrung 2, gibt es eine erhöhte Leitfähigkeit von 0,30 mS/cm in 4 m Tiefe.

4.5 CN-Analyse

Bei den Messungen des Gesamtgehaltes an Kohlen- und Stickstoff mit dem Elementaranalysator gab es in einem Durchlauf Probleme mit dem Gerät: Einzelne Proben sind nicht in das Verbrennungsrohr gefallen, das Gerät hat jedoch weitergemessen. Hierdurch gab es mehrere Verschiebungen in der Ordnung der Proben; das Gerät hat somit falsche Probenmassen zugeteilt und dadurch automatisch fehlerhafte C- und N-Gehalte errechnet. Im Vorfeld dieser Messreihe hatte es schon Probleme mit den Blind- und Eichproben gegeben, die nicht die richtigen Werte annahmen, so dass der Versuch neugestartet werden musste. In der Kürze der Zeit war es nicht möglich, mittels Fehlerrechnung akzeptable Werte für den fehlerhaften Durchlauf zu ermitteln, so dass diese Werte nicht mit in die Ergebnisse einbezogen werden. Betroffen sind Teile von Bohrkern 3, Bohrkern 7 und die obersten 6 Lagen von Bohrkern 2. Die Werte des anderen Messdurchlaufs sind fehlerfrei; beide Proben jeder Lage ergaben jeweils sehr ähnliche Werte und wurden daher gemittelt. Die Ergebnisse werden im Folgenden dargestellt.

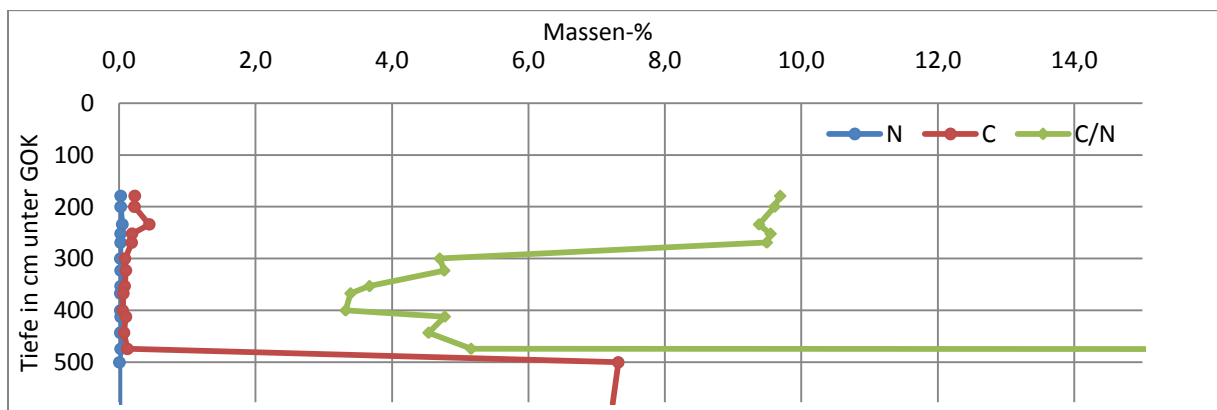


Abb. 19: Kohlenstoffgehalt, Stickstoffgehalt und C/N-Verhältnis von Bohrung 2 (das C/N-Verhältnis übersteigt in den unteren beiden Lagen 1000 und wurde abgeschnitten)

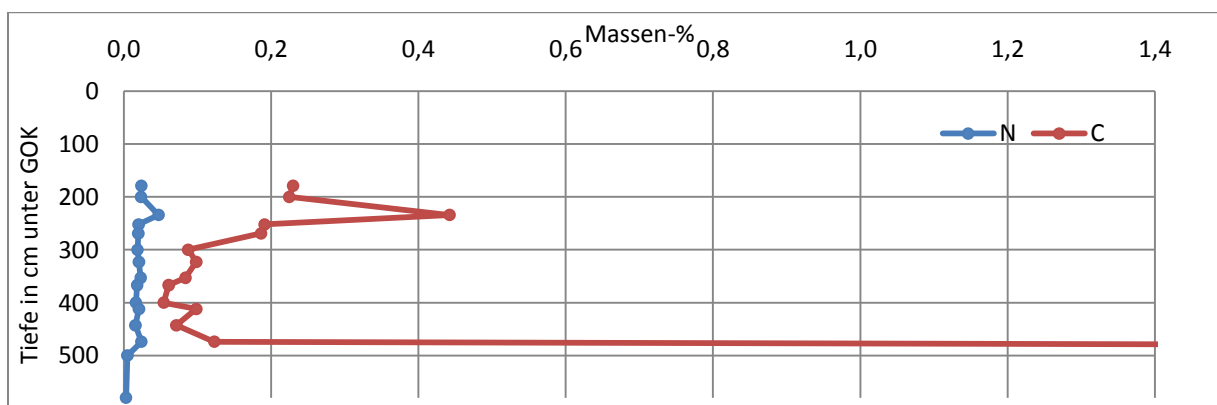


Abb. 20: Kohlenstoffgehalt und Stickstoffgehalt von Bohrung 2 (der Kohlenstoffgehalt der unteren beiden Lagen liegt über 7 % und wurde abgeschnitten)

Die Stickstoffgehalte von Bohrkern 2 sind sehr gering und liegen bei durchschnittlich 0,15 Massen-% (entspricht 1,5 g Stickstoff auf 1 kg Boden), wobei der Gehalt mit der Tiefe abnimmt und ab 5 m unter die Nachweisgrenze fällt. Die Kohlenstoffgehalte schwanken dagegen etwas stärker: Von gut 0,2 % (2 g Kohlenstoff auf 1 kg Boden) bei 2 m Tiefe steigt der C-Gehalt in den nächsten 30 cm auf 0,4 %, um dann wieder auf etwa 0,15 % zu fallen. Bei knapp 5 m Tiefe springt der Kohlenstoffgehalt dann auf über 7 % und bleibt bis zur Endteufe von 5,80 m in diesem Bereich.

Das C/N-Verhältnis bewegt sich im Bereich zwischen 10 (in den oberen Schichten) und 3, nimmt also tendenziell mit der Tiefe ab. Bei 5 m Tiefe reißt es jedoch in den Tausenderbereich aus, was darauf zurückzuführen ist, dass der Stickstoffgehalt wenig über 0 % beträgt und einen entsprechend hohen Quotienten liefert.

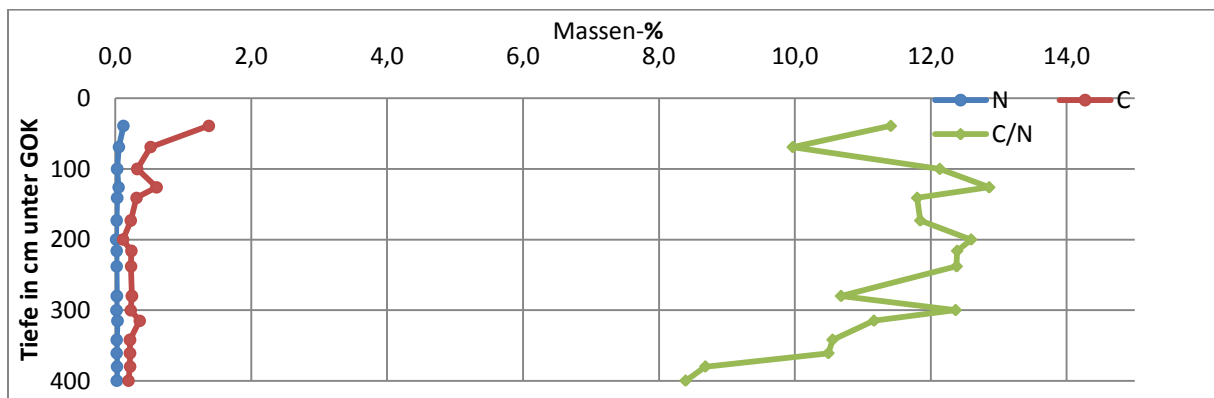


Abb. 21: Kohlenstoffgehalt, Stickstoffgehalt und C/N-Verhältnis von Bohrung 3

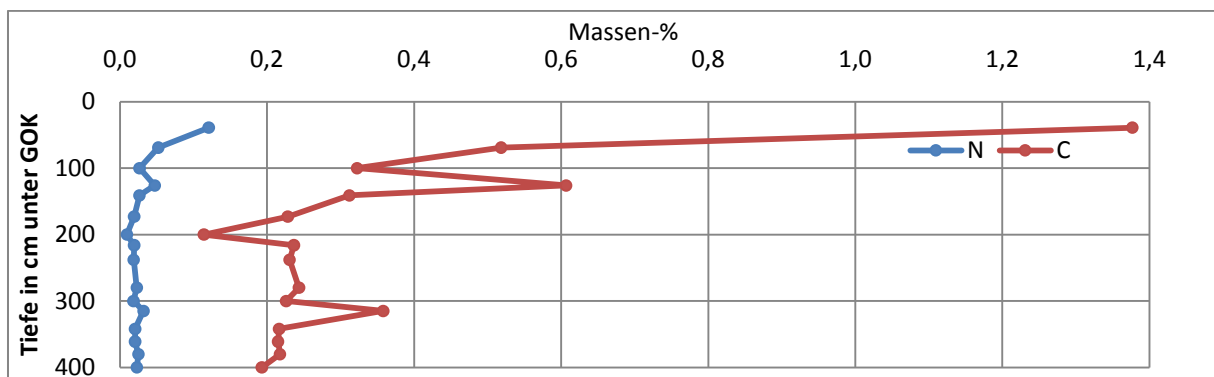


Abb. 22: Kohlenstoffgehalt und Stickstoffgehalt von Bohrung 3

In Bohrkern 3 sind die Stickstoffgehalte noch geringer als bei Bohrkern 2 und belaufen sich auf durchschnittlich 0,02 %; nur oberflächennah liegt der Gehalt bei gut 0,1 %.

Der Kohlenstoffgehalt beträgt oberflächennah rund 1,4 % und sinkt aber rasch mit der Tiefe. Ausreißer nach oben gibt es bei 1,30 m unter GOK (0,6 %) und gut 3 m

Tiefe (0,35 %). Bei 2 m Tiefe gibt es einen Ausreißer nach unten auf nur 0,1 % Kohlenstoff.

Das C/N-Verhältnis liegt zwischen 10 und 12, nimmt ab 3 m Tiefe aber kontinuierlich ab, so dass es bei 5 m unter GOK nur noch bei etwa 8 liegt.

Bei beiden Bohrkernen sind die Stickstoffgehalte sehr gering und bewegen sich meist nur knapp über der Nachweisgrenze. Die Kohlenstoffgehalte liegen grundsätzlich höher, fallen jedoch mit der Tiefe und zeigen vereinzelt Schwankungen. Bemerkenswert ist, dass bei Bohrung 2 in gut 2 m Tiefe Kohlenstoff und Stickstoff nach oben springen, während sie bei Bohrung 3 in genau 2 m Tiefe nach unten ausreißen.

5 Diskussion

Insgesamt wurden durch die Untersuchungen im Feld und Labor einige Informationen gewonnen, die erste Hinweise auf Bodenart und chronostratigraphische Einordnung geben. Im Folgenden werden die Ergebnisse diskutiert und interpretiert.

Große Gemeinsamkeiten zeigen vor allem die Bohrungen 1 und 2 im untersten Bereich: Eine hellrote, sandige und sehr carbonatreiche Schicht, die ab ca. 4,50 m Tiefe beginnt. Sie verläuft bis zur Endteufe, hat also eine Mächtigkeit von mindestens 2,5 m, erstreckt sich aber vermutlich noch sehr viel weiter in die Tiefe (über geeignete geophysikalische Messmethoden, z.B. Geoelektrik, zu bestimmen). Aufgrund der ähnlichen Eigenschaften und Höhenlagen ist davon auszugehen, dass es sich bei beiden Bohrungen um dieselbe Schicht handelt. Die helle rötliche Färbung spricht dafür, dass Hämatit enthalten ist, jedoch kein Humus, was sich mit der Studie von SCHWERTMANN (1966, vergl. Kapitel 3.2.3) deckt. Die Massenprozentzahl an Kohlenstoff in Bohrkern 2 geht in diesem Bereich zwar hoch, jedoch ist dies auf den anorganischen Kohlenstoff im Carbonat zurückzuführen. Um zu verifizieren, dass wenig oder gar kein organisch gebundener Kohlenstoff in diesen Lagen enthalten ist, muss eine erneute Messung dieser Schichten mit vorgeschalteter Zerstörung des anorganischen Kohlenstoffs erfolgen. Aufgrund der Korngröße und des Kalkgehalts können diese Lagen als Kalkarenit angesprochen werden. Es handelt sich hierbei vermutlich um den verwitterten Randbereich des anstehenden Gesteins aus dem Tortonium.

Über dem Kalkarenit von Bohrung 1 befinden sich weitere sandige Lagen mit intensiv orangeroter Färbung. Auch hier ist davon auszugehen, dass Hämatit, aber kein Humus enthalten ist. Der hohe Sandanteil deutet auf eine erhöhte Fließgeschwindigkeit bei der alluvialen Ablagerung hin. Hämatit hingegen bildet sich nur in aridem oder wechsell trockenem Klima. Diese beiden Faktoren sprechen für eine Bildung während des Pleistozäns, welches durch häufigen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten geprägt ist. Nach dieser Einordnung fehlen Lagen aus dem Pliozän (Pleistozän liegt diskordant auf Miozän); möglicherweise sind die Sande aber noch älter oder es gibt auch jüngere Kalkarenite (s. Abb. 23 für die stratigraphische Darstellung).

Bei Bohrung 2 ist es schwieriger diese Schicht auszumachen; zwar liegt über dem Kalkarenit auch dort eine sandige, kalkfreie, C_{org} -arme Lage, jedoch ist diese eher dunkelrot, während erst einen Meter höher gelegen orangefarbene, aber eher tonige Schichten auftreten.

In Bohrkern 7, welcher in der Höhenlage am Schwemmfächer nur knapp unter Bohrkern 1 liegt, tritt ebenfalls eine sandige, hellorangerote Schicht auf, jedoch erst ab 8 m Tiefe. Die schwächere Rotfärbung spricht für geringeren Hämatitgehalt; möglicherweise befindet sich hier mehr organisches Material im Boden. Kalk ist hier in keiner Lage festzustellen; der pH liegt im neutralen Bereich. Falls es sich bei den roten Lagen ebenfalls um pleistozäne Sande handelt, kann der Höhenunterschied zu Bohrung 1 (zusammen mit dem von Bohrung 2) als deutliche Schrägschichtung gedeutet werden.

Lage 14u der Bohrung 7 ist zwar sandig und skelettreich, jedoch dunkler, von brauner Färbung (vermutlich reich an organischem Kohlenstoff) und geringmächtig (knapp 20 cm) und wird daher nicht mit den als pleistozän angesprochenen Schichten in Verbindung gebracht. Um mehr über diese Schicht aussagen zu können, wären Bohrungen im Umkreis von Bohrpunkt 7 interessant; hiermit könnte beispielsweise geklärt werden, ob es sich bei der Lage um eine Linse aus größerem Material oder eine größere Schicht handelt.

In Lage 16 der gut 300 m entfernten Bohrung 3 tritt ebenfalls auffällig viel Skelett auf. Die Lage ist jedoch nur 10 cm mächtig und liegt rund 75 cm höher als Lage 14u von Bohrung 7. Da Bohrung 7 aber insgesamt weiter oben am Schwemmfächer liegt, kann mit den vorhandenen Daten kein sinnvoller Zusammenhang zwischen den beiden Lagen hergestellt werden.

Alle fünf Bohrkern zeigen eine gemeinsame Bodenart: Sie weisen tonreiche, braune und teils recht dunkle Lagen auf (oberer Bereich der Bohrungen 1, 2 und 7 und ganzheitlich in den Bohrungen 3 und 10). Diese Lagen enthalten kein Hämatit, da es bereits in geringen Mengen den Boden rötlich gefärbt hätte (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002). Stattdessen handelt es sich vermutlich um goethitischen, etwas humusreicheren Boden des Holozäns (geprägt durch feuchteres Klima). In diesen tonigen Bereichen und teils noch in den daran angrenzende sandigen

Schichten sind außerdem viele Fleckungen und Konkretionen durch Eisen- und Manganhydroxid zu finden, was wechselnde Redoxbedingungen signalisiert. Es könnte sich hierbei um ein Anzeichen für schwankende Grundwasserspiegel handeln.

Ausgeblichene, gräulichere Töne innerhalb der braunen Lagen lassen zwar Staunässe und somit anaerobe Verhältnisse in diesem Bereich vermuten (z.B. Lage 10 in Bohrung 3), jedoch korrelieren weder die im Feld beschriebene Feuchtigkeit, noch die Lage dieser Schichten innerhalb der einzelnen Kerne. Möglicherweise zeigen diese Bleichhorizonte frühere Grundwasserspiegel an. Die Eisen- und Mangankonkretionen und Fleckungen befinden sich sowohl in den Bleichhorizonten als auch in denen mit höherer Farbtintensität und geben somit keine weiteren Informationen. Nur der blasse Farbton der untersten Lage von Bohrung 3 lässt sich mit rezentem Grundwassereinfluss erklären; das reduzierende Milieu hat zu einem Bleichhorizont geführt. Die Tatsache, dass die Bohrung im Folgenden aufgrund von Kernverlust abgebrochen werden musste, unterstützt diese These; der nasse Boden ist aus der Sonde geflossen.

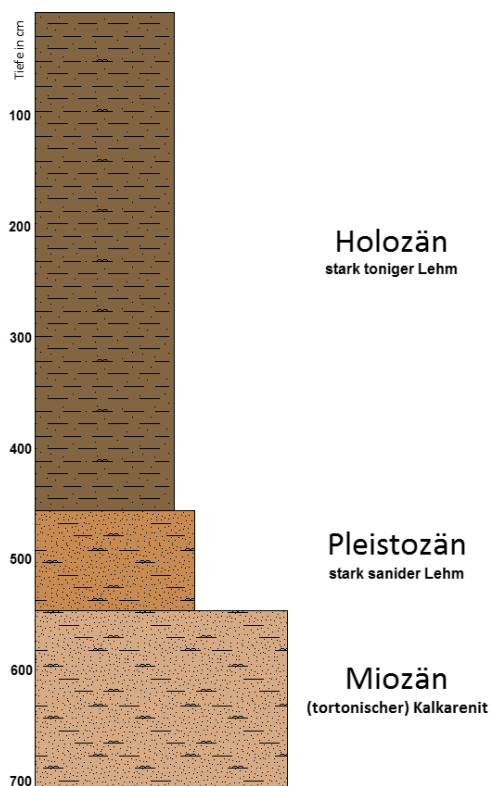


Abb. 23: Stratigraphische Einordnung von Bohrung 1. Diese erste Einschätzung weist eine Diskordanz zwischen den Schichten des Miozäns und Pleistozäns auf.

Einen rein optischen ersten Anhaltspunkt für die untere Grenze des Schwemmfächers liefern die Bohrprofile; die Bohrungen 1 und 2 haben große Ähnlichkeit, Bohrung 7 zeigt in den untersten Lagen, also deutlich tiefer, zumindest noch rötliche Schichten. Die Bohrungen 3 und 10 (beide unterhalb des Entwässerungsgrabens) weisen dagegen nur holozäne Schichten auf. Der Entwässerungsgraben bildet somit möglicherweise die natürliche Grenze des Schwemmfächers und wurde erst später anthropogen nachgezogen.

Die neutralen bis basischen pH-Werte aller Bohrkerne sind erwartungsgemäß für das Karstgebiet. Die in ca. 1 m Tiefe erhöhten pH-Werte bei den Bohrungen 2, 7 und 10 könnte durch eine nach unten geschwemmte Kalkdüngung der Felder verursacht worden sein. Der starke Sprung des pH-Wertes in der untersten Lage von Bohrung 3 unterstützt die These, dass hier der Grundwasserbereich erbohrt wurde, in welchem Salze kaum ausgewaschen werden.

Kleine pH-Schwankungen sollten generell mit Vorsicht betrachtet werden, da die Werte bei der Messung in der Suspension in der ersten Nachkommastelle etwas geschwankt haben. Möglicher Grund dafür ist, dass die Suspension nicht ganz homogen war und während der Messung die Elektrode darin bewegt wurde oder Partikel absanken.

Die im Oberboden teils stark erhöhte elektrische Leitfähigkeit ist sehr wahrscheinlich auf Düngung der Ackerfläche zurückzuführen. Eine aufwärts gerichtete Wasserbewegung (in den ariden Sommermonaten, aufgrund von Kapillarwirkung), durch die Salze nach oben transportiert und so angereichert werden, ist nicht auszuschließen, allerdings wegen der starken Regenfälle in den Wintermonaten und der Bewässerung der Felder in den Sommermonaten unwahrscheinlich.

Im übrigen Teil der Bohrkerne gab es meist nur geringe Leitfähigkeitsschwankungen, jedoch konnten diese nicht mit anderen Messungen (beispielsweise der Lagerungsdichte des Bodens) korreliert werden.

Bei Messung der Lagerungsdichte können generell methodische Fehler nicht ausgeschlossen werden; zum einen wurde sie bei den einzelnen Bohrungen nicht durchgehend von der gleichen Person bestimmt (daher eventuell subjektive Unterschiede in der Beurteilung), zum anderen könnte die Lagerung beim Erbohren

der Schicht (durch den Druck der Sonde) stark verfälscht worden sein. Diese Vermutung liegt nahe beim Betrachten der Lagerungsdichte von Bohrkern 3 (s. Bohrprofil): Im oberen Teil jedes Bohrmeters ist die Lagerung locker, wird dann in der nächsten Schicht dichter und endet bei sämtlichen Bohrmeter mit einer hohen bis sehr hohen Lagerungsdichte. Eine natürliche Entstehung von solch regelmäßigen Lagerungsmustern ist sehr unwahrscheinlich.

Die Skelettverteilungen der Bohrungen lassen sich insgesamt nur schwer korrelieren. Abbildung 12 in Kapitel 4.2 legt zwar einen generellen Trend zu erhöhtem Skelettanteil in ca. 1,2 m und 2,6 m Tiefe nahe, jedoch wurden die Werte für Bohrungen 1, 3 und 10 nur flächenbezogen erfasst. Diese Werte sind meist nicht sehr akkurat und können nicht direkt in Massenprozent übersetzt werden. Um dies zu verdeutlichen, wurden beispielhaft die im Feld geschätzten flächenbezogenen Anteile von Bohrung 2 den im Labor gemessenen Massenanteilen gegenübergestellt (Tabelle 1).

Tabelle 1: Unterschiede zwischen Feld- und Labormessung des Skeletts in Bohrung 2; rot: Flächenanteile (Feldkürzel), grün: Massenanteile, blau: Massenanteile in Feldkürzeln. Legende zu Feldkürzeln: Anhang M.

Lage	Fl.-Anteil Feld	Massen-% in Feldkürzeln	Feldschätzung vs. Laborwert	Konzentrationen	Massen-%
1 KV					
2	0	1	unterschätzt		2,7
3	1	1	richtig		1,38
4	0	< 1	unterschätzt		0,12
5	1 – 2	< 1	überschätzt		0,09
6	1	< 1	überschätzt		0,5
7	1	< 1	überschätzt		0,53
8	1	< 1	überschätzt		0,3
9	3	1	stark überschätzt	Fe-Mn, Größe der Konkretionen mit Tiefe abnehmend	5,96
10	4	4	richtig		39,58
11	3	1	stark überschätzt		5,42
12	2	1	überschätzt		7,59
13	2	1	überschätzt		1,3
14	2	< 1	überschätzt		0,16
15	2	< 1	überschätzt		0,17
16	2	1	überschätzt		2,35
17o	2	< 1	überschätzt		0,05
17u	2	0	überschätzt		0
18	0	0	richtig	keine	0
19	2 - 5 %	0	überschätzt	Kalk	0

Es fällt auf, dass besonders die Bereiche überschätzt wurden, in denen Eisen- und Mangankonkretionen im Boden sind; möglicherweise wurden diese fälschlicherweise mit zum Skelett gezählt.

Die großen weißen Klasten in den Lagen 9 bis 11 der Bohrung 2 haben einen transparent-weißen silikatischen Kern, der ummantelt ist von einem stark verwitterten, nicht auf den HCl-Schnelltest reagierenden Halo. Möglicherweise handelt es sich dabei trotzdem um carbonatisches Material, z.B. Dolomit, welcher nur sehr zögerlich mit Salzsäure reagiert (vergl. Kapitel 3.6.1). Um dies zu klären, muss eine Analyse auf anorganischen Kohlenstoff vorgenommen werden.

Es könnte sich bei den Klasten um Feuerstein aus den unmittelbar angrenzenden Bergen handeln. Das Gestein wäre dann marinen Ursprungs; zwischen kalkigen Ablagerungen hat sich auch silikatisches Material aus den Schalen und Skeletten von Meereslebewesen angesammelt, welches im Laufe der Zeit umgewandelt wurde und Silikatkonzentrationen bildete. Das carbonatische Material ist größtenteils weggewittert, so dass nur noch der dünne Halo um die Silikatkerne zu finden ist. Aufgrund der Tatsache, dass aber noch Halo vorhanden und die Rundung der Klasten sehr gering (also kantig) ist, kann ein langer Transportweg des Gesteins ausgeschlossen werden.

Es bleibt außerdem die Frage offen, warum die Klasten nur in Bohrkern 2 gefunden wurden; es könnte sich z.B. um ein räumlich begrenztes Vorkommen handeln oder die Klasten liegen verstreut (so dass bei den anderen Bohrungen zufällig keine Klasten erbohrt wurden).

Die Herkunft der rein silikatischen Körner (Skelett ohne Halo) ist nicht klar; es könnte sich ebenfalls um zerkleinertes Material aus den Feuersteinschichten der angrenzenden Berge handeln, aber auch um Material, das aus weiterer Ferne fluvial in die Polje transportiert wurde. Die Farbe der Körner legt letzteres nahe, denn während die vermeintlichen Feuersteinklasten beinahe transparent-weiße Kerne haben, sind diese Körner überwiegend orange, rot oder gelb gefärbt (typische Farben für aride Gebiete, also nicht Bildung im marinen Bereich). Rötliche Feuersteine kommen extrem selten vor. Es ist jedoch insgesamt zu wenig Skelett vorhanden, um repräsentative Farben für die einzelnen Körner zu ermitteln.

Das Vorkommen organischen Kohlenstoffs lässt sich überwiegend mit der Bodenfarbe korrelieren; die dunkelbraunen, humusreichen Lagen oben an Bohrung 3 und die ebenfalls dunkelbraune Lage 8 von Bohrung 2 weisen erhöhte C_{org} -Werte auf. Es gibt jedoch auch helle Lagen mit erhöhtem Kohlenstoffgehalt (Bohrung 3, Lage 12) und dunkle Lagen, die keine erhöhten C_{org} -Werte zeigen (z.B. Bohrung 3, Lage 9). Dies könnte auf farbgebende Minerale (z.B. dunkle Manganschlieren) zurückzuführen sein. Auch anorganischer Kohlenstoff, welcher nicht beim HCl-Schnelltest erkannt wurde (Lage 12 von Bohrung 3 befindet sich in gleicher Tiefe wie die weißen Klasten von Bohrung 2) oder Fehler bei der Farbbestimmung sind eine mögliche Erklärung. Für die Interpretation kommt erschwerend hinzu, dass der Kohlenstoff nicht unbedingt in-situ gebildet wurde, sondern auch aus höheren Lagen des Schwemmfächers abgetragen sein könnte.

Die Interpretation der CN-Analyse erweist sich als schwierig, was vor allem an den sehr niedrigen Stickstoffgehalten liegt. In den unteren Lagen von Bohrung 2 fällt der Stickstoffgehalt so tief, dass das C/N-Verhältnis unrealistisch große Werte annimmt. Die C/N-Werte in beiden Bohrkernen liegen überwiegend zwischen 9 und 13, was nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002) in dem für Ackerboden typischen Bereich (zwischen 6,3 und 23,5) liegt. In den Lagen zwischen 3,00 m und 4,74 m von Bohrung 2 fällt das C/N-Verhältnis jedoch auf 3 - 5, da hier vergleichsweise wenig C_{org} enthalten ist. Dies kann, wie Abb. 10 zeigt, sehr viele verschiedene Gründe haben. Insgesamt ist ein fallendes C/N-Verhältnis mit der Tiefe zu beobachten (bis auf die Kalkarenit-Lagen bei Bohrung 2), das auf das Alter des Sediments zurückgeführt werden könnte. In Anbetracht der rötlichen, als pleistozän gedeuteten Lagen kann das C/N-Verhältnis auch mit einer Kaltzeit in Zusammenhang gebracht werden (Kälte und Trockenheit als Grund für gehemmte Umsetzung organischen Materials). Es liegen jedoch insgesamt zu wenige Informationen vor, um eine fundierte Aussage treffen zu können.

Die sedimentologischen Untersuchungen an den Bohrkernen liefern also erste Ergebnisse, die jedoch mit weiteren Bohrungen und anderen Methoden wie absoluter Datierung und Geophysik überprüft und präzisiert werden müssen.

6 Fazit

Es konnte eine erste, sehr grobe chronostratigraphische Gliederung in pleistozäne und holozäne Sedimente anhand von Farbe und Korngrößenverteilung vorgenommen werden. Außerdem wurde anstehendes Gestein als miozän identifiziert. Diese Gliederung ist durch absolute Datierung zu überprüfen; erste Ergebnisse für die Lumineszenz-Analyse und ^{14}C -Datierung liegen voraussichtlich im Oktober 2010 vor.

Die Ergebnisse für massenbezogenes Skelett und Korngrößenverteilung von Bohrung 3 (ebenfalls im Oktober 2010 zu erwarten) könnten zudem weitere Rückschlüsse auf die Herkunft des Skelettes und Fließgeschwindigkeiten während der Ablagerungszeit zulassen.

Die Herkunft der weißen Klasten aus Bohrung 2 muss durch genauere Untersuchungen (z.B. Mikroskopieren eines Dünnschliffes) geklärt werden.

Um den Verlauf der Schichten besser nachvollziehen zu können, sollten die Ergebnisse geophysikalischer Untersuchungen am Schwemmfächer (Geoelektrik und Georadar) herangezogen werden. Da diese jedoch selten eindeutige Ergebnisse liefern, wären auch weitere Bohrungen sinnvoll (z.B. weiter östlich und höher am Schwemmfächer gelegen, soweit die Grobfraktion des Bodens es erlaubt). Bohrungen entlang des Entwässerungsgrabens könnten zudem helfen, die Grenze des Schwemmfächers nachzuprüfen.

Aus den wenigen Werten der CN-Analyse lassen sich keine ausreichenden Informationen zu Bodenbildungsverhältnissen und Paläoklima ziehen; hierfür müssen die fehlgeschlagenen Untersuchungen wiederholt und der anorganische Kohlenstoff von Bohrung 2 im Vorfeld zerstört werden.

Die Messungen von pH-Wert und elektrischer Leitfähigkeit zeigten keine besonderen Auffälligkeiten und konnten zunächst nicht für die chronostratigraphische Zuordnung genutzt werden.

Insgesamt lieferten die Untersuchung von Bodenfarbe und Fazies mit dem geringsten Aufwand die schnellste Möglichkeit, die Bodenschichten stratigraphisch

einzuordnen, wenngleich die Einordnung durch weitere Untersuchungen verifiziert werden muss. Bei der Faziesuntersuchung sollte der gravimetrischen Skelettbestimmung Vorzug gegeben werden, da diese akkuratere Ergebnisse liefert.

7 Quellen

Agencia Estatal de Meteorología – AEMET. Gobierno de España: <http://www.aemet.es/en> via „The climate“, „Climate data“ (Zugriff: 19.09.2012, s. Anhang-CD).

AHNERT, F. (2003): *Einführung in die Geomorphologie - 3. Auflage.*- Ulmer, Stuttgart.

AZANÓN, J., GALINDO-ZALDÍVAR, J., GARCÍA-DUENAS, V., JABALOY, A. (2002): *Alpine tectonics II: Betic Cordillera and Balearic Islands.*- In: *The Geology of Spain.*- von Gibbons, W., Moreno, T., 401-416, The Geological Society, London.

Ayuntamiento de Zafarraya (2010): <http://www.zafarraya.es> via „Municipio“, „Conócenos“ bzw. „Medio Físico y natural“ (Zugriff: 19.09.2010, s. Anhang-CD).

BARRON, V., TORRENT, S. (1986): *Use of Kubelka Munk theory to study the influence of iron oxides on soil colour.*- Soil Science, 37: 499-510.

DURÁN, J., LÓPEZ MARTÍNEZ, J.: (1998): *Karst en Andalucía.*- (S. 55-58), Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid, zit. in <http://www.zafarraya.es/> via „Municipio“, „Medio Físico y natural“ (Zugriff: 19.09.2010, s. Anhang-CD).

GALINDO-ZALDÍVAR, J., GIL, A., BORQUE, M., GONZÁLEZ-LODEIRO, F., JABALOY, A., MARÍN-LECHADO, C., RUANO, P., SANZ DE GALDEANO, C. (2003): *Active faulting in the internal zones of the central Betic Cordilleras (SE, Spain).*- Geodynamics, 36: 239-250.

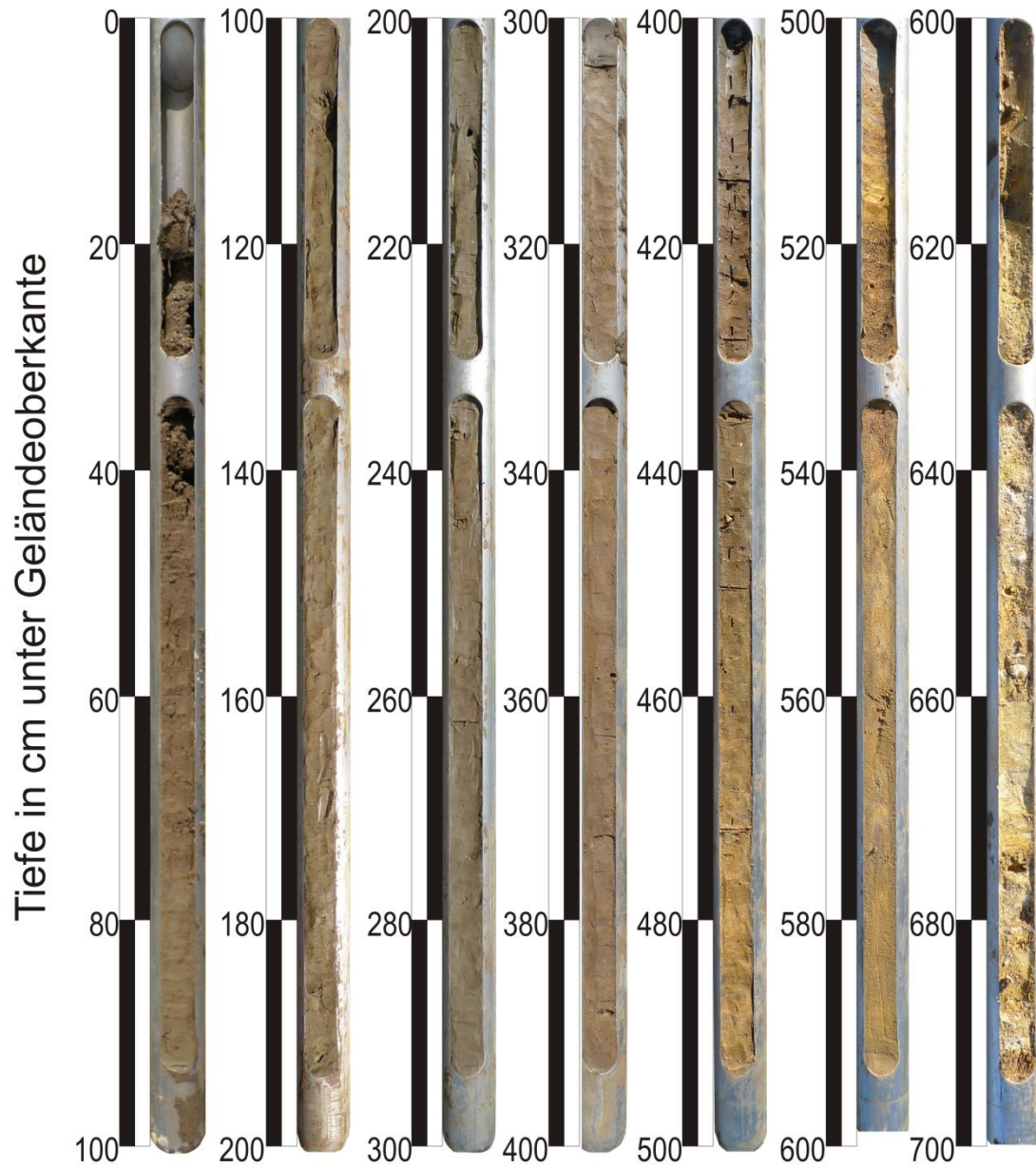
GOUDIE, A. (2004): *Encyclopedia of Geomorphology, Volume 2: J-Z.*- Routledge, London.

GRAHAM, M., EAVES, M., FARMER, J., DOBSON, J., FALICK, A. (2001): *A Study of Carbon and Nitrogen Stable Isotope and Elemental Ratios as Potential Indicators of Source and Fate of Organic Matter in Sediments of the Forth Estuary, Scotland.*- Estuarine, Coastal and Shelf Science, 52, 375-380.

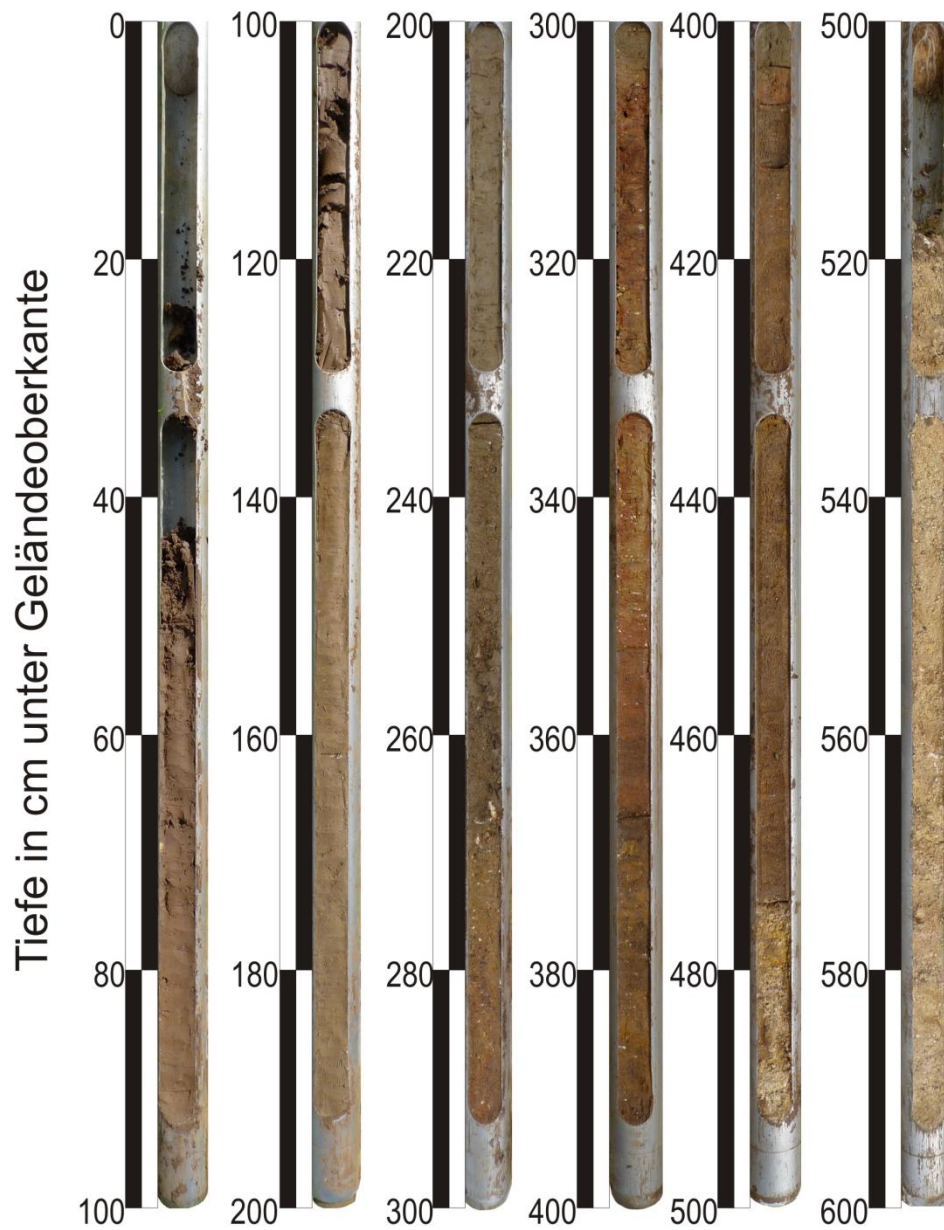
- HAAS, H. (1997): *Verbesserungen des Analyseverfahrens zur Ermittlung der Korngrößenverteilung feinkörniger Böden und Bodenanteile nach DIN 18123.*- Kirschbaum, Bonn.
- HERBIG, H.-G. (1984): *Rekonstruktion eines nicht mehr existenten Sedimentationsraumes - Die Kalkgerölle im Karbon-Flysch der Malagiden (Betische Kordillere, Südspanien).*- Springer, Berlin.
- HILTMANN, W., STRIBRNY, B. (1998): *Tonmineralogie und Bodenphysik - Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten.*- Springer, Berlin.
- KEHL, M. (2010): *Anleitung zur makroskopischen Beschreibung von Bohrkernen im Gelände.*- Köln (Anhang-CD).
- LEBLANC, D. (1990): *Tectonic adaptation of the External Zones around the curved core of an orogen: the Gibraltar Arc.*- Structural Geology - Volume 12, 8: 1013-1018.
- MARTÍN-GARCÍA, J. M., DELGADO, G., PÁRRAGA, J. F., GÁMIZ, E., DELGRADO, R. (1999): *Chemical, mineralogical and (micro)morphological study of coarse fragments in Mediterranean Red Soils.*- Geoderma, 90: 23-47.
- NICOD, J. (2003): *A little contribution to the Karst-terminology: special or aberrant cases of poljes?.*- Acta carsologica, Ljubljana.
- OYAMA, M., TAKEHARA, H. (1992): *Revised standard soil color charts.*- (ohne Verlag), Japan.
- PLATT, J., VISSERS, R. (1989): *Extensional collapse of thickened continental lithosphere: A working hypothesis for the Alboran Sea and Gibraltar arc.*- Geology, 17: 540-543.
- REICHERTER, K., JABALOY, A., GALINDO-ZALDÍVAR, J., RUANO, P., BECKER-HEIDMANN, P., MORALES, J., REISS, S., GONZÁLEZ-LODEIRO, F. (2003): *Repeated palaeoseismic activity of the Ventas de Zafarraya fault (S Spain) and its relation with the 1884 Andalusian earthquake.*- Earth Sciences (Geologische Rundschau), 92: 912-922.

- REICHERTER, K. (1994): *The Mesozoic tectono-sedimentary Evolution of the central Betic Seaway (External Betic Cordillera, southern Spain)*.- Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, A, 20: 265 ff.
- REICHERTER, K., PETERS, G. (2005): *Neotectonic evolution of the Central Betic Cordilleras (Southern Spain)*.- Tectonophysics, 405: 191-212.
- SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P. (2002): *Lehrbuch der Bodenkunde - 15. Auflage*.- Spektrum, Heidelberg.
- SCHLICHTING, E., BLUME, H.-P., STAHR, K. (1995): *Bodenkundliches Praktikum – 2. Auflage*.- Blackwell, Berlin.
- SCHULTZ, J. (2008): *Die Ökozonen der Erde - 4. Auflage*.- Ulmer, Stuttgart.
- SCHWERTMANN, U. (1966): *The inhibiting effect of soil organic matter on the crystallization of amorphous hydroxide to goethite*.- Nature, 212: 645-646.
- SFB 806: <http://www.sfb806.uni-koeln.de> (Zugriff: 19.09.2012, s. Anhang-CD).
- TURNER, S., PLATT, J., GEORGE, R., KELLEY, S., PEARSON, D., NOWELL, G. (1999): *Magmatism associated with orogenic collapse of the Betic-Alboran Domain, SE Spain*.- Petrology: 40,6: 1011-1036.
- WALTER, H., BRECKLE, S.-W. (1999): *Vegetation und Klimazonen - 7. Auflage*, Ulmer, Stuttgart.
- WALTER, H., LIETH, H., REHDER, H. (1960): *Klimadiagramm-Weltatlas*.- Fischer, Jena.

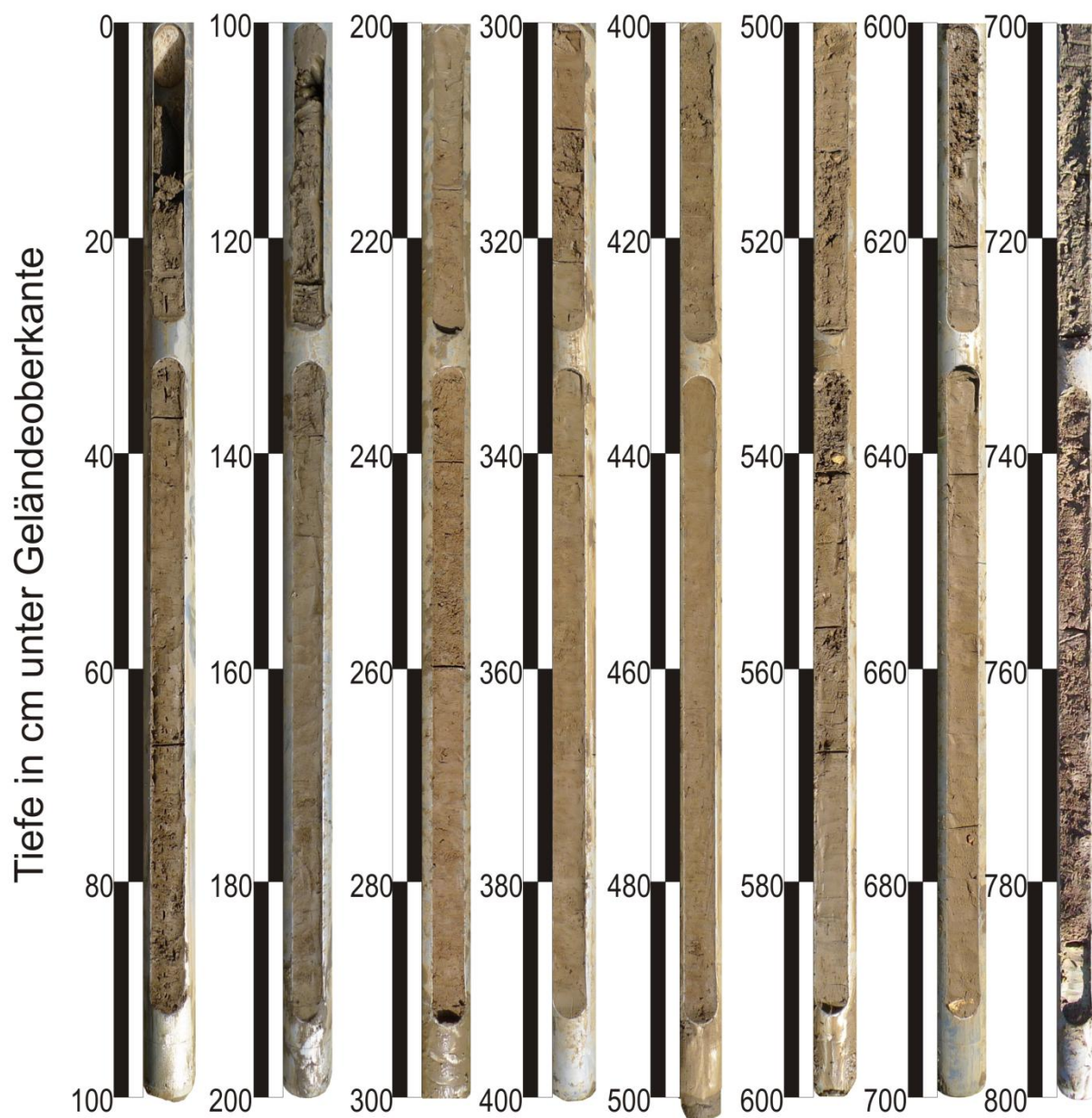
8 Anhang



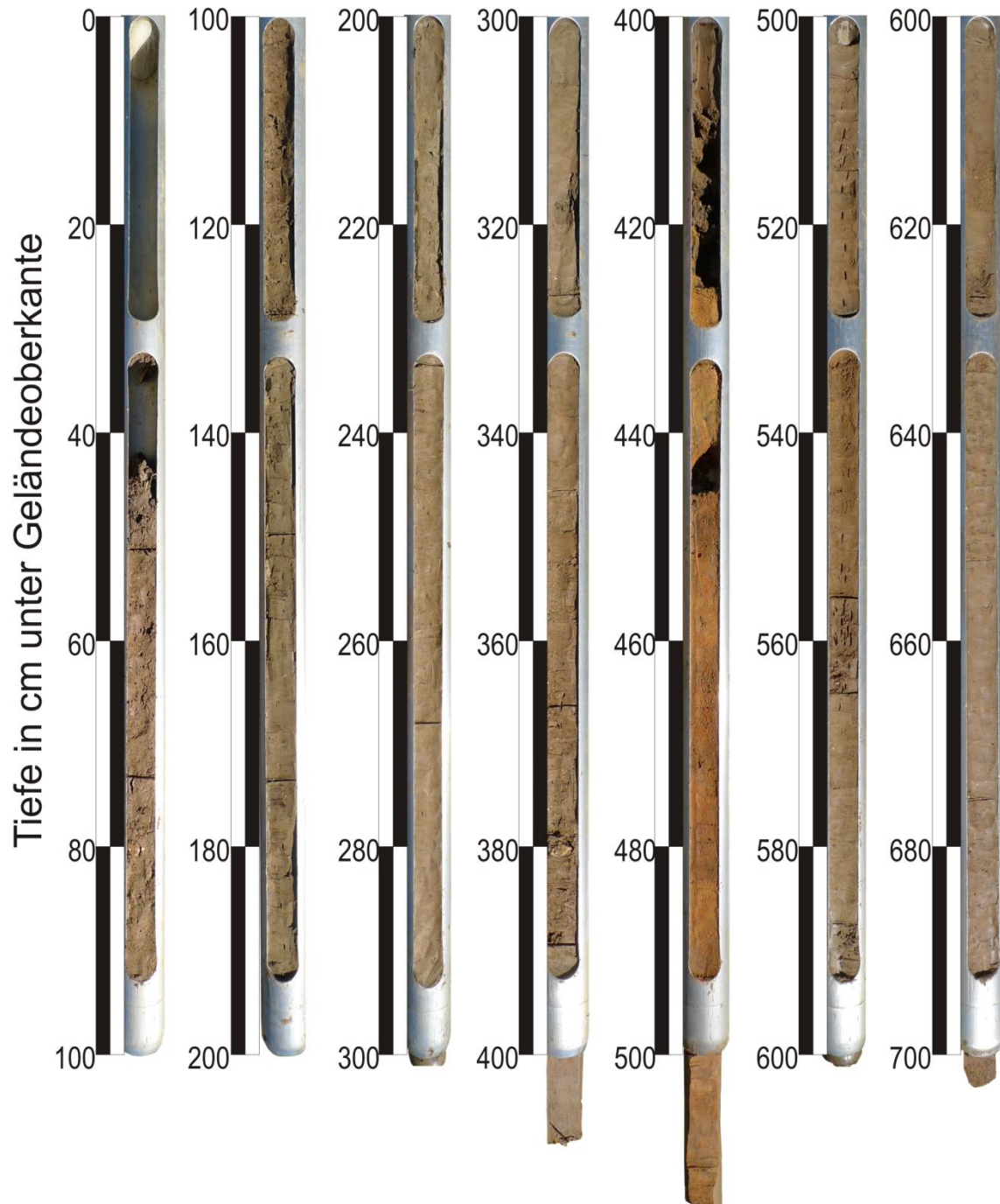
Anhang A: Detailfoto von Bohrkern 1 (nach Kehl, 2010)



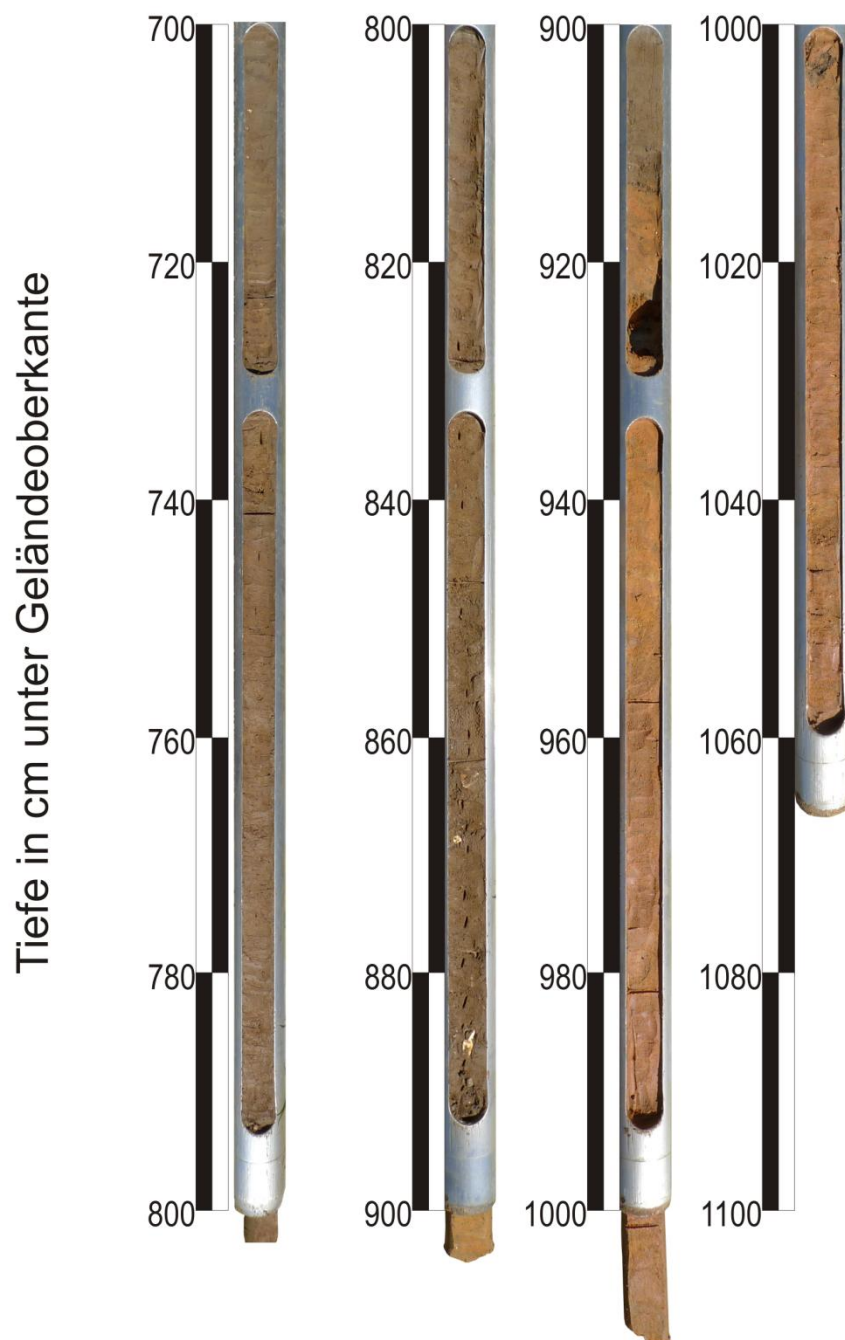
Anhang B: Detailfoto von Bohrkern 2 (nach Kehl, 2010)



Anhang C: Detailfoto von Bohrkern 3 (nach Kehl, 2010)



Anhang D: Detailfoto von Bohrkern 7, 1 m bis 7 m (nach Kehl, 2010)



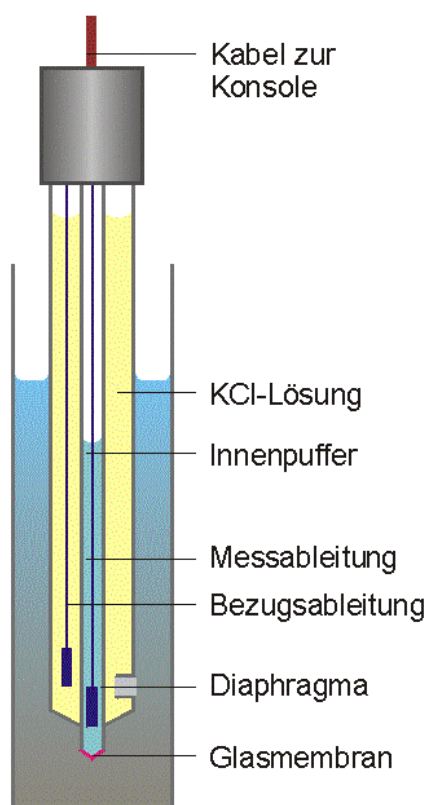
Anhang E: Detailfoto von Bohrkern 7, 7 m bis Endteufe (nach Kehl, 2010)



Anhang F: Detailfoto von Bohrkern 10 (nach Kehl, 2010)

Anhang G: MUNSELL-Farben von Eisenmineralen und Huminstoffen (nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002)

	Farbbereich	Farbton Ø	Trivial	Helligkeitsbereich	Helligkeit Ø	Farbtiefenbereich	Farbtiefe Ø
Hämatit	3,5 R bis 4,1 YR	1,2 YR	<i>rot</i>	2,4 bis 4,4	3,6	1,5 bis 7,9	5,2
Goethit	7,3 YR bis 1,6 Y	0,4 Y	<i>gelbbraun</i>	4,0 bis 6,8	6,0	6,0 bis 7,9	6,9
Lepidokrokit	4,9 YR bis 7,9 YR	6,8 YR	<i>gelborange</i>	4,6 bis 5,9	5,5	7,1 bis 9,9	8,2
Ferrihydrit	2,8 YR bis 9,2 YR	6,6 YR	<i>rotbraun</i>	2,3 bis 6,3	4,9	1,9 bis 7,3	6,3
Akaganéit	1,2 YR bis 6,8 YR	5,2 YR	<i>rotbraun</i>	2,8 bis 4,3	3,8	4,4 bis 7,3	5,8
Schwertmannit	6,2 YR bis 0,3 Y	8,5 YR	<i>orange</i>	4,7 bis 6,7	5,9	4,0 bis 9,1	6,9
Ferroyhit	3,7 YR bis 5,4	4,2 YR	<i>rotbraun</i>	3,4 bis 4,7	3,8	5,5 bis 7,0	6
Maghemit	6,2 YR bis 9,4 YR	8,3 YR	<i>braunrot</i>	2,5 bis 3,6	3,1	2,5 bis 4,1	3,2
Jarosit	2,6 Y bis 3,6 Y	3,0 Y	<i>hellgelb</i>	7,4 bis 8,0	7,8	3,8 bis 6,2	5,1
Huminsäure	6,1 R bis 5,1 YR	9,5 R	<i>dunkelbraun</i>	1,8 bis 3,3	2,4	0,7 bis 2,9	1,5
Fulvosäure	6,8 YR bis 9,1 YR	7,9 YR	<i>hellbraun</i>	5,1 bis 7,1	6,0	3,5 bis 4,9	4



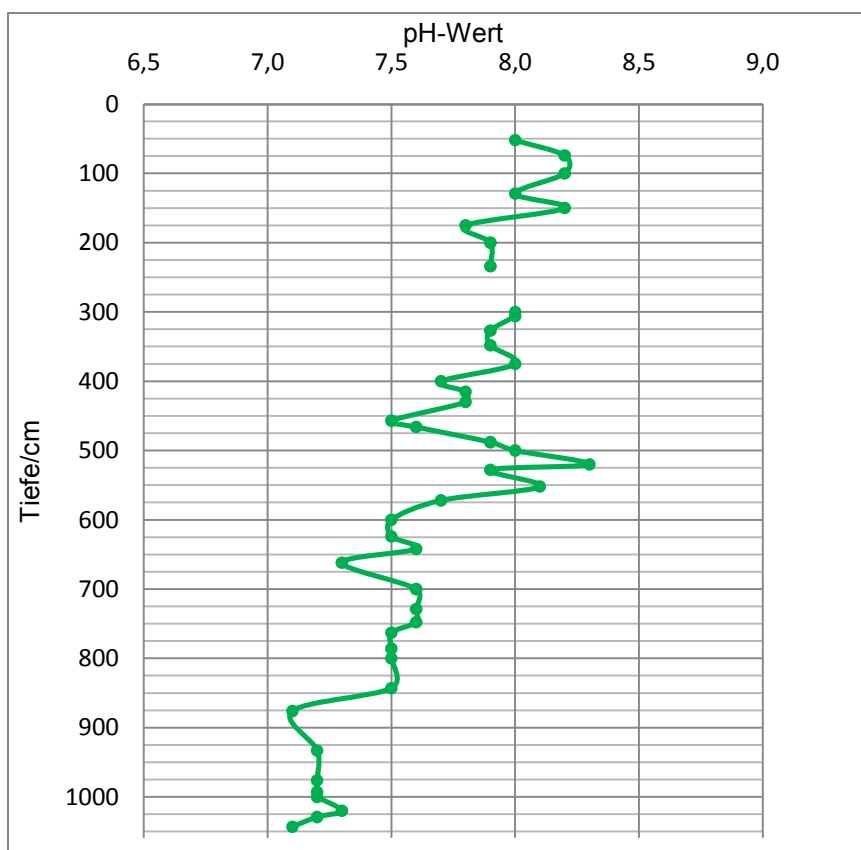
Anhang H: schematische Skizze der Einstab-Messelektrode zur Bestimmung des pH-Wertes

Anhang I: Ergebnisse der CN-Analyse von Bohrung 2

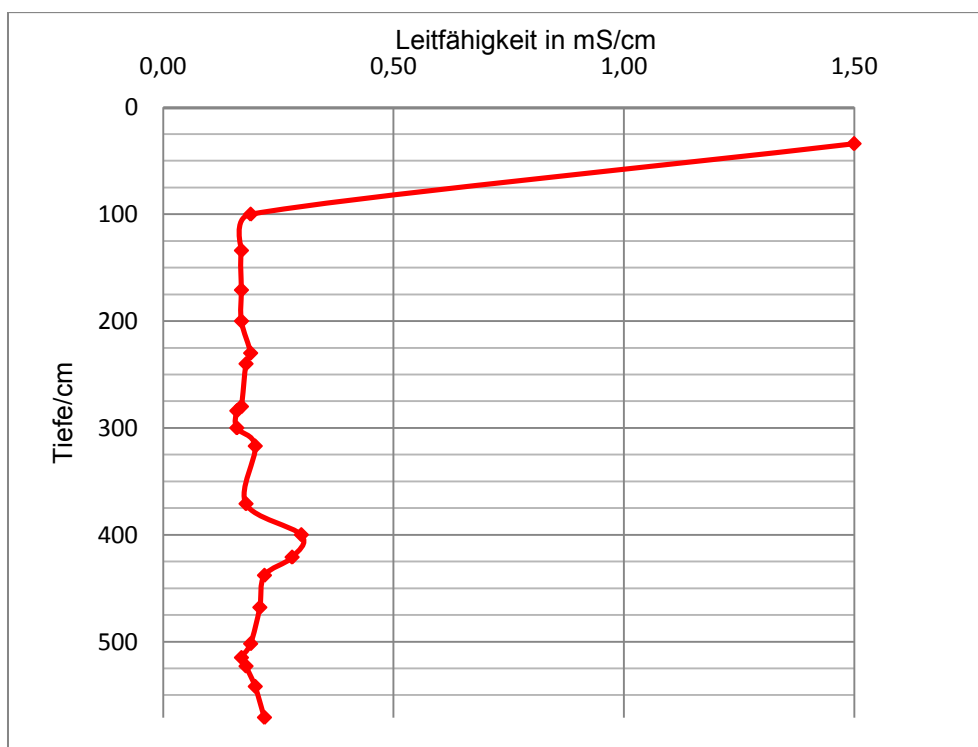
Lage	N in Massen-%	C in Massen-%	C/N
b3-6	0,02	0,23	9,69
b3-7	0,02	0,22	9,61
b3-8	0,05	0,44	9,38
b3-9	0,02	0,19	9,55
b3-10	0,02	0,19	9,49
b3-11	0,02	0,09	4,70
b3-12	0,02	0,10	4,77
b3-13	0,02	0,08	3,67
b3-14	0,02	0,06	3,39
b3-15	0,02	0,05	3,32
b3-16	0,02	0,10	4,77
b3-17o	0,02	0,07	4,54
b3-17u	0,02	0,12	5,16
b3-18	0,00	7,32	1503,44
b3-19	0,00	7,24	2362,53

Anhang J: Ergebnisse der CN-Analyse von Bohrung 2

Lage	N in Massen-%	C in Massen-%	C/N
b3-1	0,12	1,38	11,41
b3-2	0,05	0,52	9,97
b3-3	0,03	0,32	12,13
b3-4	0,05	0,61	12,86
b3-5	0,03	0,31	11,80
b3-6	0,02	0,23	11,84
b3-7	0,01	0,11	12,59
b3-8	0,02	0,24	12,39
b3-9	0,02	0,23	12,38
b3-10o	0,02	0,24	10,68
b3-10u	0,02	0,23	12,37
b3-11	0,03	0,36	11,16
b3-12	0,02	0,22	10,55
b3-13	0,02	0,21	10,49
b3-14o	0,03	0,22	8,68
b3-14u	0,02	0,19	8,39



Anhang K: pH-Werte (in Suspension gemessen) von Bohrung 7



Anhang L: Werte der elektrischen Leitfähigkeit (in mS/cm) von Bohrung 10

Anhang M: korrigierte und ergänzte tabellarische Zusammenfassung der Bohrergebnisse
LEGENDE zu den nachfolgenden Bohrtabellen

grün	nachträglich im Labor ermittelt
blau	nachträglich im Labor ermittelt durch N. HÖBIG und M. SCHRAMM

Lage	KV	steht für Kernverlust
	V	steht für Verschleppung

Grenze/cm	Untergrenze der jeweiligen Schicht
Grenze neu	neu berechnete Untergrenze (nach Stauchung der Überstände) in cm

Farbe	Farbe der feuchten Probe nach Munsell-Farbtafel; <i>Farbbereiche</i> wurden gemittelt, z.B. "5 YR 3/4 bis 5 YR 5/4" = 5 YR 4/4
--------------	--

Fleckung	Code	Bedeutung
	Fe-/Mn	Eisen-/Manganhydroxid
	Bd	Bänderung

Code	Beschreibung	Flächen-%
K	keine	0
SW	sehr wenige	0 bis 2
W	wenige	2 bis 5
M	mäßig viele	5 bis 15
V	viele	15 bis 40
SV	sehr viele	> 40

Code	Beschreibung	mm
SF	sehr fein	< 2
F	fein	2 bis 6
MG	mittelgroß	6 bis 20
G	groß	> 20

Carbonat	Code	Bezeichnung	Carbonate in %
	c0	carbonatfrei	0
	c1	sehr carbonatarm	< 0, 5
	c2	carbonatarm	0,5 bis 2
	c3	mäßig carbonathaltig	2 bis 10
	c4	carbonatreich	10 bis 25
	c5	sehr carbonatreich	> 25

Übergang	Code	Art	innerhalb von
	S	scharf	0 - 1 cm
	De	deutlich	1 - 3 cm
	A	allmählich	3 - 6 cm
	Di	diffus	> 6 cm

Skelett	Code	Beschreibung	in	Rundung
		Skelett Flächen-%		
	1	< 1		sehr schwach
	2	1 - 10		schwach
	3	10 - 30		mittel
	4	30 - 50		stark
	5	50 - 75		sehr stark
	X, G, Gr	>75		Skelettboden

Code	Kornform bei 2 - 63 mm
g	kiesig
gr	grusig

Körnung	Korngrößen und Bindigkeit nach Kehl (2010) oder nach DIN 4022
----------------	---

Lagerung	Code	Lagerung
	gering	locker
	mittel	mäßig dicht
	hoch	dicht
	sehr hoch	sehr dicht

Konzentrationen	Code	Bedeutung
	Fe/Mn	Eisen-/Manganhydroxid-Konkretion
	Kalk	Kalkkonkretion

Anhang M: korrigierte und ergänzte tabellarische Zusammenfassung der Bohrergebnisse

Datum	Bohrung	Rechtswert	Hochwert	Höhe ü. NN	Hangneigung	Nutzung	Vegetation				
10.03.2010	1	UTM 4093661	30S 398236	940 ± 3 m	minimal	Landwirtschaft	vereinzelt Gräser				
Lage	Grenze (cm)	Über-gang	Farbe	Fleckung	Wasser-gehalt	Körnung	Skelett (Fl.-%)	Car-bonat	Lagerung	Konzen-tration	Gefüge
1	40	A	10 YR 3/3	K	nass	Tu 3	< 1	c0	gering		kohärent
2 V	57	De	10 YR 3/4	Fe-Mn; S, SF/F	nass/feucht	Tu 3	1 - 10	c0	mittel	Fe-Mn	kohärent
3 V	75	De	10 YR 3/4	Fe-Mn; W, F	nass/feucht	UH 3	1 - 10	c0	mittel	Fe-Mn	kohärent
4	100	—	10 YR 4/3	Fe-Mn; V, F	feucht	Lt 3	< 1	c0	hoch	Fe-Mn	kohärent
5	110		10 YR 3/3	Fe-Mn; S, SF/F	feucht	Tu 4	< 1	c0	hoch		kohärent
6	145		2,5 YR 3/3	Fe-Mn; V, F	trocken	Tu 4	1 - 10	c0	s. hoch	pedog.	kohärent
7	160		10 YR 4/4	Fe-Mn; SV, F	trocken	Ts 2	1 - 10	c0	s. hoch	Ton	kohärent
8	179	De	10 YR 3/4	weiß S, SF	trocken	Tl	10- 30 gr	c0	s. hoch		kohärent
9	200	—	10 YR 3/4	Fe-Mn; weiß M, F	trocken	Lts	1 - 10 g	c0	s. hoch	Fe-Mn!	kohärent
10	246		10 YR 3/4	Fe-Mn S, SF	trocken	Ts 2	1 - 10	c0	s. hoch		kohärent
11	261		7,5 YR 3/4	K	trocken	Tu 2	< 1	c0	s. hoch		kohärent
12	300	—	7,5 YR 3/4	Fe-Mn; S, SF	trocken	Tt	< 1	c0	s. hoch		kohärent
12 B	304	S	7,5 YR 3/4	Fe-Mn; S, SF	trocken	Tt	< 1	c0	s. hoch		kohärent
13	327	Di	7,5 YR 4,5/6	Fe-Mn; M F	feucht	Lts / Lt3	< 1	c0	mittel		kohärent
14	342	Di	7,5 YR 4/6	Fe-Mn; MG M	feucht	Lts / Lt3	< 1	c0	mittel		kohärent
15	369	Di	7,5 YR 4/6	Fe-Mn; W,F	feucht	Lts	1 - 10	c0	mittel		kohärent
16	400	Di	7,5 YR 4/6	Fe-Mn; M F	feucht	Lts	1 - 10	c0	mittel		kohärent
17	428	De	7,5 YR 4/5	Fe-Mn; SF	feucht	Lts	< 1	c0			kohärent
18	450	A	7,5 YR 4/4	Fe-Mn; SF + F	feucht	Lts	ca. 1	c0			kohärent
19	471	A	7,5 YR 5/8	Fe-Mn; F	tr.feucht	Ls 2	< 1	c0		Mn	kohärent
20	500	A	10 YR 5/8	Fe-Mn; MG	tr.feucht	Ls 3	< 1	c0		Mn	kohärent
21	519		8,75 YR 6/8	Fe-Mn; SV, MG	feucht	Ls 3	< 1	c0	mittel	Fe-Mn	kohärent
22	541	S	7,5 YR 5/7	Fe-Mn; Vi, MG	feucht	Ls 4	< 1	c0	mittel-hoch	Fe-Mn	kohärent
23	595	A	10 YR 6/6	Fe-Mn; Sv, MG	feucht	Ls 3	< 1	c0	mittel	Fe-Mn	kohärent
24	600	—						c3			
25 V	617										
26 V	634	S	10 YR 6/6	Fe-Mn-Bd	feucht	Ls 3	< 1	c5	hoch	Kalk	kohärent
27	649	S	10 YR 7/3	K	trocken	Kalkkruste	> 75	c5	s. hoch	Kalk	verkittet
28	675	S	10 YR 6/6	Fe-Mn-Bd V, F - MG	feucht	Ls 2	1 - 10	c5	hoch	Kalk	kohärent
29	700		10 YR 6/8	Fe-Mn-Bd W, F	feucht	Ls 2	10- 30	c5	hoch	Kalk	verkittet

Anhang M: korrigierte und ergänzte tabellarische Zusammenfassung der Bohrerergebnisse

Datum	Bohrung	Rechtswert	Hochwert	Höhe ü NN	Hangneigung	Nutzung	Vegetation
11.03.2010	2	30 S 398273	UTM 4093788	940 ± 4 m	minimal	Landwirtschaft	Gras

Lage	Grenze (cm)	Übergang	Farbe	Fleckung	Wassergehalt	Körnung	Skelett (Fl.-%)	Carbonat	Lagerung	Konzentration	Gefüge
1 KV	44										krümelig
2	64		10 YR 3/3	K	feucht	Lu	0	c0	gering	-	kohärent
3	100		7.5 YR 4/4	W, SF	feucht	Tu4	1 gr	c0	mittel	-	kohärent
4	119		7.5 YR 4/4	Fe-Mn, S, SF	feucht	Ut4	0	c0	gering		kohärent
5	151		10 YR 4/4	Fe-Mn, W, SF	feucht	Tu4	1-2 gr	c0	mittel		kohärent
6	179		10 YR 3/4	Fe-Mn, M, SF-F	feucht	Lu	1 gr	c0	hoch		kohärent
7	200		10 YR 4/4	Fe-Mn, W, SF	feucht	Lu	1 gr	c0	hoch		kohärent
8	234		10 YR 3/3	Fe-Mn, W, F	feucht	Lu	1 gr	c0	hoch		kohärent
9	252		7.5 YR 4/3	Fe-Mn, SF-F	feucht	Ts4	3 gr	c0	hoch		kohärent
10	269		10 YR 3/3	Fe-Mn, V, SF-MG	feucht	Ts4	4 g-gr	c0	hoch		kohärent
11	300		5 YR 4/7	Fe-Mn, V, F-MG	feucht	Lt s	3 gr	c0	s. hoch		kohärent
12	323	De	5 YR 4/8	V	feucht	Lt s	2 gr	c0	mittel		kohärent
13	353	De	5 YR 3/4	SV	feucht	Lt s	2 gr	c0	hoch		kohärent
14	367	De	5 YR 4/4	V	feucht	Lt s	2 k	c0	hoch		kohärent
15	400	De	5 YR 4/3	SV	feucht	Ls4	2 k	c0	hoch		kohärent
16	412	De	7.5 YR 4/4	Fe, etw. Mn; V	feucht	Ls3	2	c0	hoch		kohärent
17o	443	Di	7.5 YR 4/4	Fe, etw. Mn; V	feucht	Ls4	2	c0	hoch		kohärent
17u	474		7.5 YR 4/4	Fe, etw. Mn; V	feucht	Sl2	2	c0	hoch		kohärent
18	500	De	10 YR 6/4	marmoriert	trocken	Sl2		c4	hoch	keine	verkittet
19	580		10 YR 6/4	marmoriert	trocken	Sl2	2 - 5 %	c4	s. hoch	Kalk	verkittet

Fe-Mn, die Größe der Konkretionen nimmt mit der Tiefe ab

Anhang M: korrigierte und ergänzte tabellarische Zusammenfassung der Bohrergebnisse

Datum	Bohrung	Rechtswert	Hochwert	Höhe ü NN	Hangneigung	Nutzung	Vegetation
12.03.2010	3	4°08'35.84" W	36°58'52,89" N	ca. 890 m	minimal	Landwirtschaft	-

Lage	Grenze (cm)	Übergang	Farbe	Fleckung	Wassergehalt	Körnung	Skelett (Fl.-%)	Carbonat	Lagerung	Konzentration	Gefüge
0 KV	16										
1	39	De	2,5 Y 3/2		nass		1	c0	gering		
2	69	A	2,5 Y 3/2	S, SF	feucht		0	c0	m.-hoch		
3	100		2,5 Y 3/2	S, SF	feucht		2	c0	hoch		
4	126	S	2,5 Y 4/3	K	nass		3	c0	gering		
5	141	S	2,5 Y 4/3	S, SF	feucht		2	c0	hoch		
6	173	De	2,5 Y 4/3	S	feucht		1	c0	hoch		
7	200		2,5 Y 4/3	S (Mn)	feucht		1	c0	hoch	Mn	
8	216	S	2,5 Y 4/3	K	nass		0	c0	gering		
9	238	A	10 YR 3/3	S, SF (Mn)	feucht		2	c0	hoch		
10 o			2,5 Y 4/3				1	c0			
10 m			10 YR 4/4	V, F (Fe)	feucht			c0	(s.) hoch		
10 u	300		2,5 Y 4/3					c0			
11	315	De	2,5 Y 4/2	W, SF (Mn)	nass		0	c0	gering		
12	342	A	10 YR 3/4	V, F	feucht		0	c0	mittel		
13	361	S	10 YR 3/4	V, F	feucht		0-1	c0	mittel		
14	400		10 YR 3/4	V, MG	feucht		0	c0	hoch		
15	410		10 YR 3/4	K	feucht		0-1	c0	ger.-mittel		
16	420	S	10 YR 4/4	K	feucht		2	c0	mittel		
17	444	A	2,5 Y 4/3	V, MG	feucht		0	c0	mittel		
18 o			2,5 Y 3/3	V, MG	feucht		1	c0	mittel-hoch		
18 u	500		10 YR 3/3					c0			
19a	510		10 YR 3/3	K, S	nass		2	c0	gering		
19b	520	A	10 YR 4/4	F	nass		2	c0	gering		
20	534		10 YR 4/4	K	feucht		2	c0	mittel		
21	550		10 YR 4/3	K	feucht		0	c0	mittel		
22	567	A	10 YR 4/4	M, F	feucht		0	c0	hoch		
23	581		10 YR 4/3	V, F	feucht		0	c0	hoch		
24	600		10 YR 4/3	W, F	feucht		2	c0			
25	612		10 YR 4/4	K	nass		1	c0	hoch		
26	630		10 YR 3/4	K	feucht		2	c0	mittel-hoch		
27	644		10 YR 4/3	K	nass		2 g	c0	hoch		
28	657		10 YR 3/4	W, F	feucht		2	c0	mittel		

im Gelände nicht bestimmt, Laboregebnisse bleiben abzuwarten

im Gelände nicht bestimmt, Laboregebnisse bleiben abzuwarten

Anhang M: korrigierte und ergänzte tabellarische Zusammenfassung der Bohrergebnisse

29	668	10 YR 3/4	W, F	feucht	1	c0	mittel	
30	700	10 YR 3/3	V, (S?)	feucht	0	c0	hoch	
31	722	10 YR 3/4	k	feucht	2	c0	mittel	
32	744	10 YR 4/3	S, FS	feucht	0-1	c0	hoch	Mn
33	776	10 YR 4/3	W, F	feucht	0-1	c0	hoch	Mn
34	800	10 YR 4/4	W, F	feucht	1 - 2 gr	c0	hoch	Mn
35	816	10 YR 3/3	K	nass	2	c0	ger.-mittel	
36	830	2,5 Y 4/4	K	gesättigt	2 - 3 gr	c0	gering	
37	840	2,5 Y 4/3	K	feucht	1	c0	ger.-mittel	
38	845	2,5 Y 4/3	K	nass	2	c0	gering	
39	857	10 YR 3/3	K	feucht	2	c0	hoch	Mn
40	886	10 YR 3/3	W, F	feucht	3 gr	c0	hoch	Mn
41	900	2,5 Y 5/4	M, F	feucht	0-1 gr	c0	sehr hoch	
41 KV	910							

Anhang M: korrigierte und ergänzte tabellarische Zusammenfassung der Bohrergebnisse

Datum	Bohrung	Rechtswert	Hochwert	Höhe ü NN	Hangneigung	Nutzung	Vegetation
16.03.2010	7	W 4,13967°	N 36.08220°	893 ± 4 m	minimal	Landwirtschaft	vereinzelt Gräser

Lage	Grenze (cm)	Übergang	Farbe	Fleckung	Wassergehalt	Körnung	Skelett (Fl.-%)	Carbonat	Lagerung	Konzentration	Gefüge
0 KV	44										
1	52	De	7,5 YR 4/4	k	feucht	T,u,fs,ms	0	c0	gering		kohärent
2	74	A	7,5 YR 4/4	k	feucht	T,u,fs,ms	0-1	c0	hoch		kohärent
3	100	—	7,5 YR 4/4	k	feucht	T,u,fs,ms	1-10	c0	hoch		kohärent
4	129	Di	7,5 YR 4/4	S; SF-F	feucht	T,u,fs,ms	0	c0	mittel		kohärent
5	150	A	10 YR 4/4	S; SF	feucht	T,u,fs	0	c0	hoch		kohärent
6	175	A	10 YR 4/4	W: SF-F	feucht	T,u'	0	c0	hoch	Mn, Fe	kohärent
7	200	—	10 YR 4/4	M; SF-F	feucht	T,u'	0-1	c0	hoch	Mn, Fe	kohärent
8	234	A	10 YR 4/4	W; F	feucht	T,u'	0	c0	hoch	Mn, Fe	kohärent
9	267,5	Di	10 YR 4/4	M; SF-F	feucht	T,u'	0	c0	hoch	Mn, Fe	kohärent
10	300	—	10 YR 4/4	M; SF-F	feucht	T,u'	0	c0	hoch	Mn, Fe	kohärent
11	306	A	10 YR 3/4	SW; SF	feucht	T,u',s"	0	c0	hoch	Fe, Mn	kohärent
12	327	A	10 YR 4/4	SW; SF-F	feucht	T,u',s"	0-1	c0	hoch	Fe, Mn	kohärent
13	348	De	10 YR 4/4	W; SF-F	feucht	T,u',s"	0	c0	hoch	Fe, Mn	kohärent
14 o	368		7,5 YR 4/4	SW; SF-F	feucht	T,u',s"	1-10	c0	hoch	Fe, Mn	kohärent
14 u	385	De	7,5 YR 4/4	SW; SF-F	feucht	fS,ü,t	1-10	c0	hoch	Fe, Mn	kohärent
15	400	—	7,5 YR 4/4	SW; SF	feucht	T,u',s"	0	c0	hoch	Fe, Mn	kohärent
15 V	405				Verschleppung, Lage wurde nicht beprobt						
16	415	De	7,5 YR 4/4	SW; F	feucht	U,t,s"	0-1	c0	mittel hoch	Mn, Fe	kohärent
17	430	De	7,5 YR 4/4	SW; SF	feucht	U,t,s"	0	c0	mittel hoch	Mn, Fe	kohärent
18	457	A	7,5 YR 4/4	SW; SF	feucht	U,t,s"	0	c0	mittel hoch	Mn, Fe	kohärent
19	466	De	7,5 YR 3/4	k	feucht	U,t,s"	1-10	c0	hoch		kohärent
20	488	De	10 YR 4/4	W; SF-F	feucht	U,t,s"	0	c0	hoch	Mn, Fe	kohärent
21	500	—	10 YR 4/4	M; F	feucht	T,u,f-ms"	0	c0	hoch	Mn !	kohärent
21 KV	503										
22	520	S	10 YR 3/4	W; SF	feucht	T,u,f-ms"	0-1	c0	mittel	Fe, Mn	kohärent
23	528	De	8,8 YR 4/4	M; SF	feucht	T,u,f-ms"	0	c0	mittel	Fe, Mn	kohärent
24	552	A	10 YR 4/4	SV; SF-F	feucht	T,u,f-ms"	0	c0	sehr hoch	Mn ! Fe	kohärent
25	572	A	10 YR 4/4	V; SF	feucht	T,u,f-ms"	0	c0	sehr hoch	Fe, Mn	kohärent

Anhang M: korrigierte und ergänzte tabellarische Zusammenfassung der Bohrerergebnisse

26	600	—	10 YR 4/4	V; SF	feucht	T,ū,s"	0	c0	sehr hoch	Fe, Mn	kohärent
27	624	De	10 YR 4/4	M; SF-F	feucht	T,ū,s"	0-1	c0	hoch	Fe, Mn	kohärent
28	642	De	10 YR 4/4	SW; SF	feucht	T,ū,s"	0-1	c0	mittel hoch	Fe, Mn	kohärent
29 o	662	Di	10 YR 4/4	SW; SF	feucht	T,ū,s"	0-1	c0	mittel hoch	Fe, Mn	kohärent
29 u	681	De	10 YR 4/4	SW; SF	feucht	T,ū,s"	0-1	c0	mittel hoch	Fe, Mn	kohärent
30	700	—	10 YR 4/4	SW; SF	feucht	T,ū,s"	0-1	c0	mittel hoch	Fe, Mn	kohärent
31	729	De	7,5 YR 4/6	M; SF-F	feucht	T,u,ms,fs"	0	c0	mittel hoch	Fe, Mn	kohärent
32	748	A	7,5 YR 4/6	W; SF-F	feucht	T,u,ms,fs"	0-1	c0	mittel hoch	Fe, Mn	kohärent
33	763	A	7,5 YR 4/6	SW; SF	feucht	T,u,ms,fs"	0-1	c0	hoch	Mn	kohärent
34	282	S	7,5 YR 4/5	V; SF-F	feucht	T,u,ms,fs"	1-10	c0	hoch	Mn!	kohärent
35	800	—	7,5 YR 6/8	V; F	feucht	T,u,ms,fs"	0	c0	sehr hoch	Fe, Mn	kohärent
35 V	819			Verschleppung, Lage wurde nicht beprobt							
36	843	A	7,5 YR 5/8	V; SF-F	feucht	fS,ū,t,ms'	0	c0	sehr hoch	Fe, Mn	
37 o	856		7,5 YR 6/8	V; SF-F	feucht	fS,ū,t,ms'	0	c0	sehr hoch	Fe, Mn	
37 m	876		5 YR 5/8	V; SF-F	feucht	fS,ū,t,ms'	0	c0	sehr hoch	Fe, Mn	
37 u	900	—	5 YR 5/8	V; SF-F	feucht	fS,ū,t,ms'	0	c0	sehr hoch	Fe, Mn	
37 V	913			Verschleppung, Lage wurde nicht beprobt							
38	933	A	5 YR 5/8	V; F	feucht	fS,ū,t,ms'	0	c0	sehr dicht		
39	976	A	5 YR 5/8	M; SF-F	feucht	fS,ū,t,ms'	0	c0	dicht		
40	993	—	5 YR 5/8	V; SF	feucht	fS,ū,t,ms'	0	c0	dicht		
41	1000	—	5 YR 5/8	V; SF	feucht	fS,ū,t,ms'	0	c0	dicht		
42	1020	De	5 YR 4/8	V; SF	feucht	fS,ū,t,ms'	0	c0	sehr dicht		
43	1029	De	5 YR 4/8	M;SF-F	feucht	fS,ū,t,ms'	0	c0	sehr dicht		
44	1043		5 YR 4/6	V;SF-F	feucht	fS,ū,t,ms'	0	c0	sehr dicht		
45	1059		5 YR 4/6	M; SF-F	feucht	fS,ū,t,ms'	0	c0	sehr dicht		

im Gelände nicht beschrieben

Anhang M: korrigierte und ergänzte tabellarische Zusammenfassung der Bohrergebnisse

Datum	Bohrung	Rechtswert	Hochwert	Höhe ü NN	Hangneigung	Nutzung	Vegetation
18.03.2010	BP 10	W 004.14121	N 36.98015	892 m	minimal	Landwirtschaft	keine (Ackerbrache)

Lage	Grenze (cm)	Übergang	Farbe	Fleckung	Wassergehalt	Körnung	Skelett (Fl.-%)	Carbonat	Lagerung	Konzentration	Gefüge
1	34	im Gelände nicht beschrieben	10 YR 3/3		feucht	T,ü,fs'	1 - 10	c0	gering	keine	kohärent
2	100		10 YR 4/4	V, SF-F	feucht	T,ü,fs'	ca. 1	c0	mittel/hoch	Mn,Fe!	kohärent
3	134		10 YR 4/4	MV, SF-GR	feucht/nass	T,ü,fs'	ca. 1	c0	(sehr) hoch	Mn,Fe	kohärent
4	171		10 YR 4/4	V, SF-F	feucht	T,ü,fs'	ca. 1	c0	(sehr) hoch	Mn,Fe	kohärent
5	200		10 YR 4/4	MV, SF-F	feucht	T,ü,fs'	0	c0	hoch	Mn,Fe	kohärent
6	230		10 YR 5/4	MV, SF-F	feucht	U,fs,ms,t	ca. 1	c0	mittel	Mn,Fe	kohärent
7	240		10 YR 4/4	V, F-MG	feucht	T,ü,fs''	1 - 10	c0	mittel	Mn,Fe	kohärent
8	280		10 YR 4/4	W, SF	feucht	T,ü,fs''	ca. 1	c0	mittel	Mn,Fe	kohärent
9	284		10 YR 4/4	M,F-MG	feucht	T,ü,fs''	1 - 10 gr	c0	hoch	Mn,Fe	kohärent
10	300		10 YR 4/4	S, SF	feucht	T,ü,fs''	0	c0	mittel/hoch	Mn,Fe	kohärent
11	317		10 YR 4/4	W,F	gesättigt	T,ü,fs''	ca. 1	c0	gering	Mn,Fe	kohärent
12	371		10 YR 4/4	V,SF-F	feucht	T,ü,fs''	ca. 1	c0	mittel/hoch	Mn,Fe	kohärent
13	400		10 YR 4/4	V,SF	feucht	T,ü,fs''	ca. 1	c0	mittel/hoch	Mn,Fe	kohärent
14	421		10 YR 4/4		feucht	T,ü,fs''	ca. 1	c0	gering/mittel	Mn,Fe	kohärent
15	438		10 YR 4/4	V,SF	feucht	T,ü,fs''	ca. 1	c0	hoch	Mn,Fe	kohärent
16	468		10 YR 4/4	V,F	feucht	T,ü,fs''	1 - 10	c0	hoch	Mn,Fe	kohärent
17	502		10 YR 4/4	V,F	feucht	T,ü,fs''	1 - 10	c0	hoch	Mn,Fe	kohärent
18	515		10 YR 4/4	SV,F	feucht	T,ü,fs''		c0	hoch	Mn,Fe	kohärent
19	523		10 YR 4/4	SV,F	feucht	T,ü,fs''	1 - 10	c0	hoch	Mn,Fe	kohärent
20	542		10 YR 4/4	SV,F	feucht	T,ü,fs''	ca. 1	c0	hoch	Mn,Fe	kohärent
21	571		10 YR 4/4	SV,SF-F (MG)	feucht	T,ü,fs''	ca. 1	c0	hoch	Mn,Fe	kohärent

Übersicht über die untersuchten Bohrprofile 1, 2, 3, 7 und 10

