

Sedimentologische Untersuchungen an
Bohrkernen der Laguna de Medina, Südspanien

Sedimentological investigations of drill cores of the
Laguna de Medina, southern Spain

Bachelorarbeit von Daniel Henning Pflieger aus Köln

vorgelegt der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der RWTH Aachen.

Ort und Datum der Abgabe: Aachen, 5. Juni 2015.

Matrikelnummer: 275516

Prüfer: Prof. Dr. Klaus Reicherter
Dr. Margret Mathes-Schmidt

Institut: Neotektonik und Georisiken

Versicherung an Eides statt

"Hiermit erkläre ich, Daniel Henning Pflieger, an Eides statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe."

Daniel Henning Pflieger, 05.06.2015

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung.....	4
Projekt	4
Das Untersuchungsgebiet.....	6
Geographischer Überblick.....	6
Geologischer Überblick.....	7
2. Methoden.....	10
Probennahme	10
Untersuchung der Proben	12
Magnetische Suszeptibilität.....	13
Messung magnetischer Suszeptibilität	15
Untersuchung von See-Sedimenten.....	16
Messung der magnetischen Suszeptibilität an Sedimentkernen	17
Messung der magnetischen Suszeptibilität an den Bohrkernen der Laguna de Medina	18
Messung der magnetischen Suszeptibilität der Oberflächenproben.....	19
Datenanalyse	19
3. Ergebnisse	19
LML1	21
LML2	21
LML3	23
Oberflächenproben	23
4. Interpretation	24
5. Diskussion	26
6. Fazit.....	27

1. Einführung

Projekt

Um die Entwicklung des modernen Menschen genauer zu erforschen, wurde im Jahre 2009 im Zusammenschluss der RWTH Aachen, der Universität zu Köln und der Universität Bonn der Sonderforschungsbereich (SFB, im englischen CRC) 806 gegründet. Das Projekt mit dem Titel: „Unser Weg nach Europa: Kultur-Umwelt-Interaktion und menschliche Mobilität im Späten Quartär“ untersucht, wie sich der Mensch von Afrika nach West-Eurasien, insbesondere nach Europa, unter Berücksichtigung von regional-strukturellen, klimatischen, umweltbedingten und soziokulturellen Zusammenhängen ausbreitete und ansiedelte. Der Fokus liegt hierbei auf der Zeitspanne der letzten 190 000 Jahre, welche das vorletzte Glazial, den letzten Interglazial-Glazial-Zyklus und das Holozän einschließen (CRC 806, 2015a).

Der SFB wird durch interdisziplinäre Arbeit von Geologen, Geoarchäologen, Archäologen und Geowissenschaftlern geprägt und gliedert sich in drei verschiedene Themenbereiche. Zum einen wird die primäre Expansion und Ansiedlung des modernen Menschen untersucht, des Weiteren werden die sekundäre Expansion und der Rückzug ergründet und zuletzt wird die Wechselwirkung zwischen Bevölkerungsdynamik und Umwelteinflüssen erforscht (CRC 806, 2015a).

Der Schwerpunkt der geowissenschaftlichen Untersuchungen liegt in der Paläoklimatologie.

Durch Analysen verschiedener Klimaarchive sollen Aussagen über den Einfluss des Klimas auf anthropogene Bewegungen getroffen und diese Daten mit archäologischen Funden korreliert werden (von Harten, 2014, unveröffentlicht).

Der heutige Forschungsstand spricht für die Hypothese, dass der moderne Mensch seinen Ursprung in Ostafrika hat und über zwei unterschiedliche Routen nach Europa gelangte (CRC 806, 2015a).

Abbildung 1. zeigt diese Wege, die untersuchten geologischen Archive und archäologische Fundorte. Die östliche Route verläuft

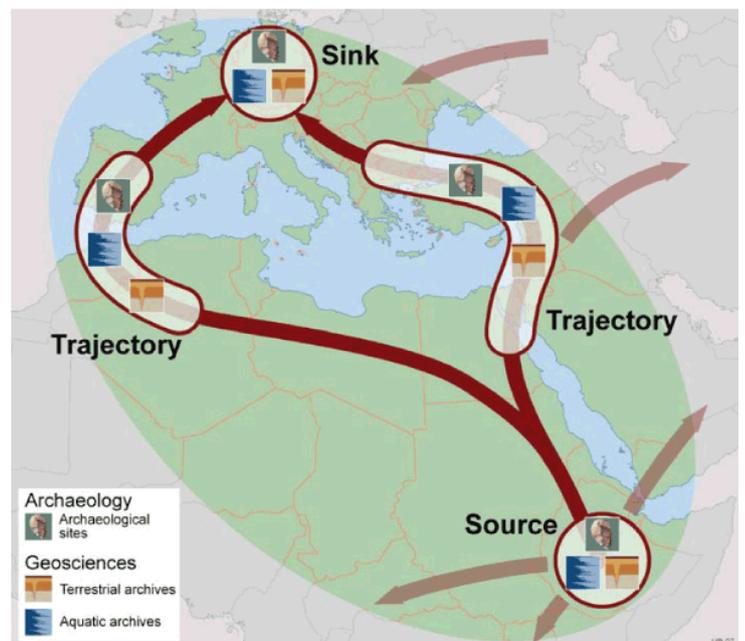


Abbildung 1: Die östliche und westliche Route des Homo Sapiens aus Afrika nach Europa (CRC 806, 2015a).

über Vorderasien nach Südosteuropa, von wo aus sich der moderne Mensch bis Zentraleuropa ausbreitete. Die westliche Route verläuft über die Meerenge zwischen Iberischer Halbinsel und Nord Afrika, die Straße von Gibraltar, deren Distanz sich aufgrund der eustatischen Meeresspiegelschwankung im späten Pleistozän vermutlich von 14 km auf ca. 5 km reduzierte (CRC 806, 2015a; 2015b).

Das Teilprojekt C3, in dessen Rahmen diese Arbeit verfasst wird, gehört zur Untersuchungsgruppe der westlichen Route und soll die regionale Lücke auf der Iberischen Halbinsel zwischen den bereits erschlossenen paläoklimatologischen marinen Archiven im Atlantik vor der portugiesischen Küste und den terrestrischen Archiven bei Granada schließen (CRC 806, 2015c).

Zwischen der nordafrikanischen Küstenlinie und den nördlichen Ausläufern der Pyrenäen, zwischen den Feuchtzonen des südwestlichen Europas und den ariden Regionen Nordafrikas, überlagern sich eine Vielzahl biogeographischer Zonen. Daher ist dieser Bereich besonders interessant für die Untersuchung des Kulturwandels und der Abhängigkeit dieser Entwicklungen von klimatischen Bedingungen und Umwelteinflüssen. Hierfür erscheinen Seen und Lagunen als nachhaltige und kontinuierliche natürliche Archive besonders geeignet (CRC 806, 2015c).

Im September 2014 wurde eine Bohrkampagne gestartet, um die limnischen Sedimente der Laguna de Medina zu erforschen. Der spanische Begriff „Laguna“ bezieht sich auf Salzwasser- und Süßwasserseen; bei der Laguna de Medina handelt es sich um einen endorheischen salinen See (CRC 806, 2015c). Dieser ist im regionalen Vergleich zu anderen Seen sehr geeignet, da er starke biologische Klimaproxies, besonders fossile Diatomeen über die Zeit konserviert hat (Reed, Stevenson & Juggins, 2001).

In der Mitte des Sees wurde eine Hauptbohrung mit einer Tiefe von 22,29 m und in dem Uferbereich des Sees drei weitere Bohrungen abgeteuft (CRC 806, 2015d). Die erschlossenen Sedimente sollen verglichen werden, um vergangene Schwankungen des Seewasserstandes zu analysieren und auf das Paläoklima rückschließen zu können. Das Ziel dieser Arbeit ist es, die drei Uferbohrungen mit Hilfe von Messungen der magnetischen Suszeptibilität zu beschreiben und somit eine Basis für weitere Untersuchungen zu schaffen.

Das Untersuchungsgebiet

Geographischer Überblick

Die Laguna de Medina ($36^{\circ}37'18''\text{N}$, $6^{\circ}02'48''\text{W}$) ist ein meso-saliner (5 – 10 g/l) See in Andalusien, Spanien, südlich der Stadt Jerez de la Frontera und der größte See der Provinz Cádiz mit einer Fläche von etwa 121 Hektar. Drei Kilometer nördlich der Laguna de Medina liegt der Fluss Guadalete und sechs Kilometer südlich des Sees der Fluss Salado (Abb. 2). Das hügelige Gebiet, in dem der endorheische See 30 m über dem Meeresspiegel liegt, wurde 1987 zu einem Naturschutzgebiet erklärt. Das Einzugsgebiet des Sees ist ca. 16 km² groß (Reed, 1998a & 1998b; Reed et al., 2001).

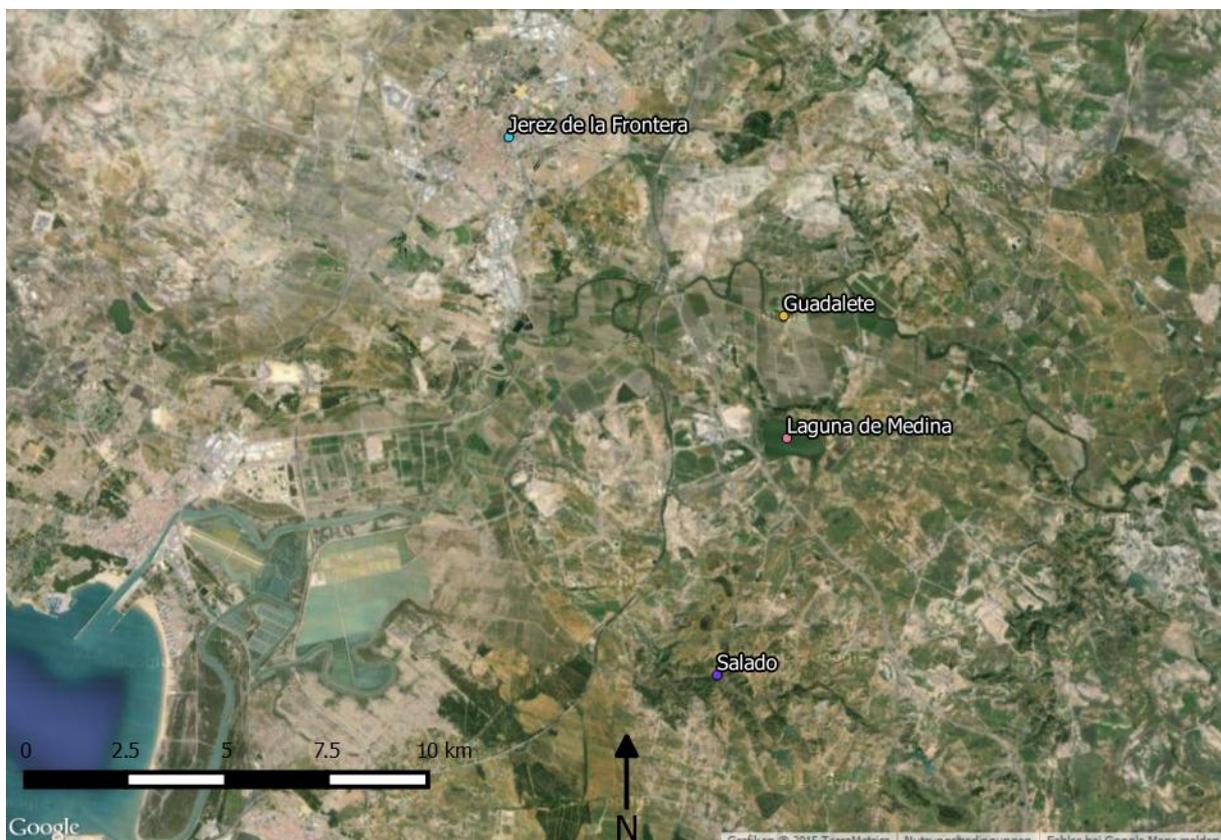


Abbildung 2: Geographische Lage des Untersuchungsgebietes (modifiziert nach Google Maps, 2015).

Das Klima der iberischen Halbinsel weist aufgrund der Kombination der atlantischen, kontinentalen und subtropischen Wettersysteme eine hohe Diversität auf. Die variierende Berglandschaft sorgt darüber hinaus in manchen Regionen für Regenschatten (Reed, 1998a).

Starke Seespiegelschwankungen und damit auch Schwankungen des Salzgehaltes des Sees treten über das Jahr verteilt auf. Das Klima der Region ist geprägt von heißen trockenen Sommern von April bis September, in denen der semipermanente See in Trockenzeiten komplett austrocknet (Reed, 1998b; Reed et al., 2001). Die sommerlichen Tagestemperaturen

betragen häufig 33 °C und können auf über 40 °C ansteigen. In den milden humiden Winterzeiten, bei niedrigen Temperaturen bis zu 6 °C, kann die Laguna de Medina eine Wassertiefe von ca. 2,2 m erreichen (Reed et al., 2001). Reed et al. (2001) stellte fest, dass die bei hohem Wasserspiegel gemessenen Salzgehalte von 1,5 g/l im Jahre 1965 über 6,5 g/l 1982 bis zu 10 g/l im Jahre 1992/93 als mögliche Folge einer Reduktion des Seespiegels über die letzten Jahrzehnte anstiegen.

Während der Bohrkampagne am See im September 2014 wurde eine maximale Wassertiefe von 1,2 m gemessen.

Geologischer Überblick

Die Iberische Halbinsel ist ein Mikrokontinent, der zwischen der konvergierenden Afrikanischen- und Europäischen-Platte liegt.

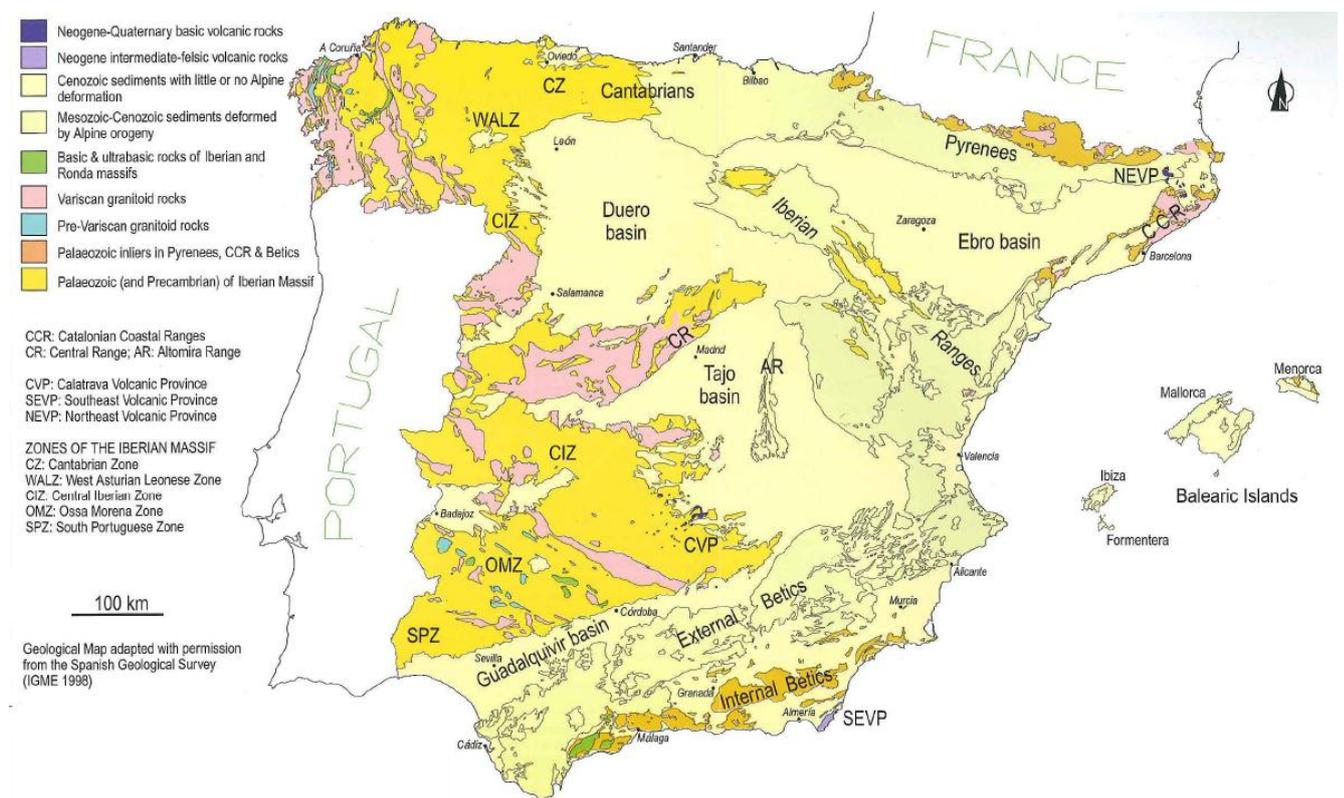


Abbildung 3: Geologie Spaniens, die unterschiedlichen Zonen des Iberischen Massivs, Gebirge und Becken (Gibbons & Moreno, 2002).

Die heutige Topographie der Iberischen Halbinsel ist geprägt durch das Iberische Massiv, welches eine fast komplett ungestörte Geotraverse ist und einen autochthonen Ursprung hat (Ábalos et al., 2002). Das Massiv setzt sich aus unterschiedlichen Zonen zusammen, welche in Abbildung 3 dargestellt sind. In der Kantabrischen Zone finden sich nicht-metamorphe

Gesteine des älteren Paläozoikums, vor allem des Karbons. Gesteine des jungen Paläozoikums, des Kambriums und des Ordoviziums kommen am häufigsten in der West-Asturleonischen Zone vor. Daneben treten wenige Gesteine aus den Zeiten von Silur bis Karbon auf. In der Zentraliberischen Zone entstammen die ältesten Gesteine, die Orthogneise und Paragneise, aus dem Kambrium. In der Ossa Morena Zone finden sich hauptsächlich präkambrische Gesteine des späten Proterozoikums. In der Südportugiesischen Zone finden sich ausschließlich Gesteine des späten Devons bis zum Karbon. Zusammen bilden diese fünf Zonen den größten europäischen aufgeschlossenen Komplex präpermischer Gesteine. Die Zentraliberische, die West-Asturleonische und die Kantabrische Zone repräsentieren die ehemalige Grenze Gondwanas (Palomeras et al., 2009; Pinheiro, Wilson, Pena dos Reis, Whitmarsh & Ribeiro, 1996).

Prägende tektonische Prozesse traten während des Mesozoikums und des Tertiärs auf. Diese tektonische Evolution der Iberischen Platte beinhaltet Grabenbildung und Beckenformationen während des Mesozoikums. Daneben folgte aus kompressiven Bedingungen, die durch die alpidischen Orogenese in der späten Kreide induziert wurden, die Genese verschiedener Gebirgsketten. Während des Tertiärs führten ebenfalls kompressive Kräfte zu Orogenese sowohl im Inneren als auch an den Grenzen der Platte (Casas-Sainz & de Vicente, 2009; Cloetingh, 2002).

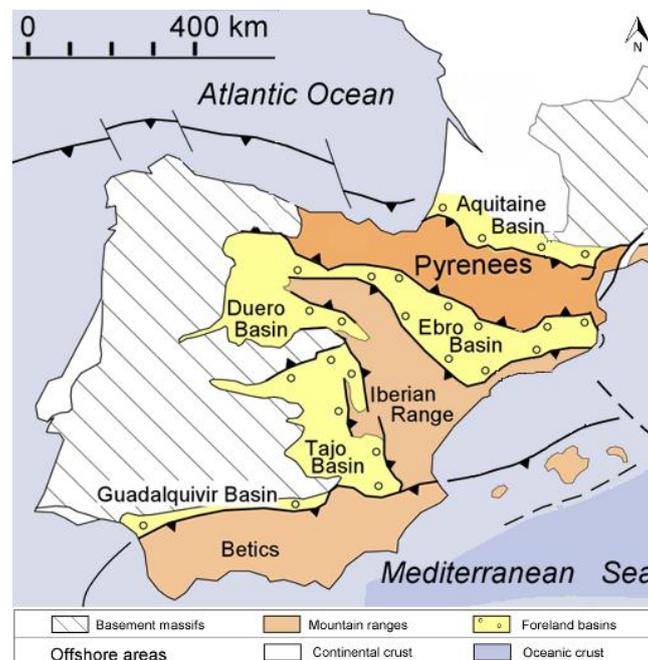


Abbildung 4: Iberische Halbinsel mit den Haupt-Orogenesen ausgelöst durch die Afrika-Europa Kollision (modifiziert nach Vergés, Fernández & Martínez (2002) & Vergés & Fernández (2006)).

Während des Neogens entstanden im Nordosten der Iberischen Halbinsel die Pyrenäen, die heute an der Grenzen zwischen Spanien und Frankreich liegen (Casas-Sainz & de Vicente, 2009; Cloetingh, 2002). Zeitgleich fand eine Grabenbildung auf der Seite des Mittelmeeres statt (Casas-Sainz & de Vicente, 2009). Erst im Miozän entstand die Betische Kordillere durch ein N-S wirkendes Kompressionsmilieu, das auch während der Orogenese der Pyrenäen vorherrschte (Cloetingh, 2002). Abbildung 4 gibt eine Übersicht der tektonischen Kräfte auf der Iberischen Halbinsel während sich die Afrikanische Platte kontinuierlich nach Norden und Nordwesten bewegt (Vergés & Fernàndez, 2006).

Die Betische Kordillere ist eine Gebirgskette, die sich zur heutigen Zeit von der Meeresbucht des Golfs von Cádiz bis zum Kap „Capo de la Nao“ an der Costa Blanca erstreckt und durch die Konvergenz zwischen der Afrikanischen und der Iberischen Platte entstand (Ábalos et al., 2002; Alonso-Zarza et al., 2002). In Folge dieser Orogenese entwickelte sich während des Neogens und des Quartärs das Guadalquivir Becken, in dem auch die Laguna de Medina liegt (Salvany, Larrasoaña, Mediavilla & Rebollo, 2011; Alonso-Zarza et al., 2002). Das Guadalquivir Becken ist eine ENE-WSW–gerichtete Depression (Cloetingh, 2002), die zwischen der äußeren Zone der Betischen Kordillere im Süden und dem Iberischen Massiv im Norden auf einer Höhe von 20 m – 50 m über dem Meeresspiegel liegt (Salvany et al., 2011; Reed, 1998b). Im südlichen Bereich des Beckens kommen an vielen Stellen tertiäre und triassische Evaporite vor (Gutiérrez et al., 2007). Die meisten Salzseen der Region liegen in Lösungs- und Senkungsprozesse von Evaporiten begründet (Reed, 1998b).

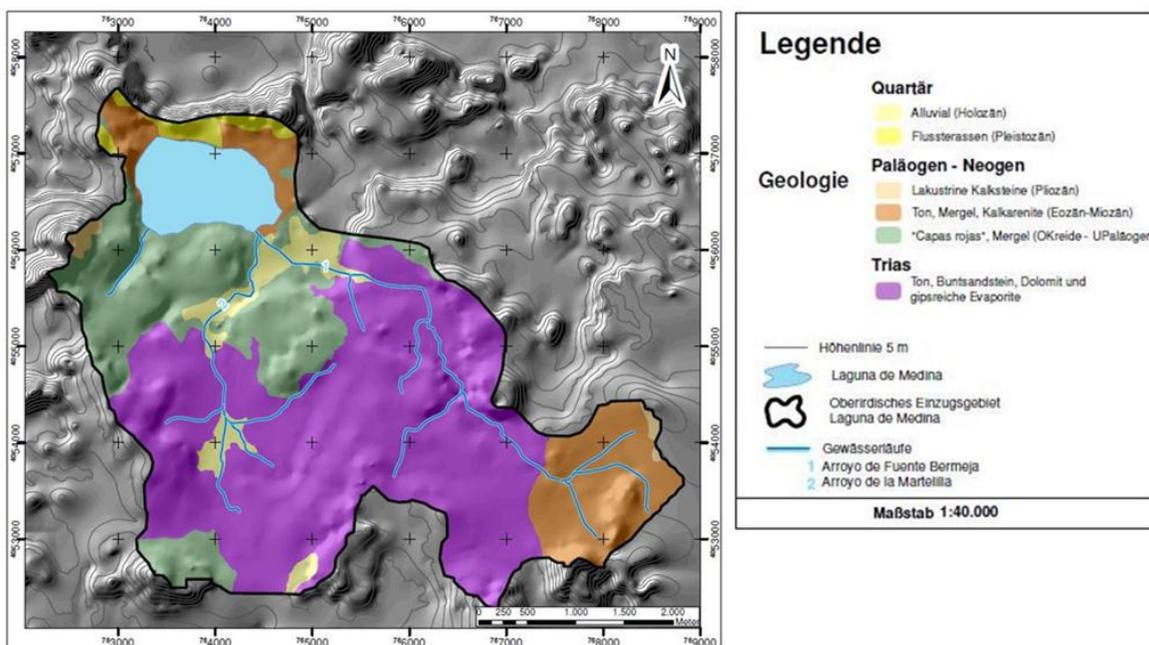


Abbildung 5: Einzugsgebiet der Laguna de Medina (Mreyen, 2013, unveröffentlicht).

Während des späten Pleistozäns bildete sich die heutige Konfiguration des Seebeckens, das durch unterirdische Karstphänomene entstand (Reed et al., 2001). Abbildung 5 stellt das Einzugsgebiet der Laguna de Medina und dessen Geologie dar. Es wird von marinen triassischen Tonen, gipsreichen Evaporiten und eozänen Mergeln dominiert. Nördlich der Laguna de Medina finden sich Tone, Sande und dolomitische Sedimente der Trias. Westlich lagern primär dunkelgrüne Tone des Tertiärs. Mergel der Kreide und des Tertiärs kommen südlich und südöstlich des Sees vor (Reed et al., 2001).

Die heutige tektonische Aktivität der Region Cádiz ist sehr gering und wird durch Reed et al. (2001) mit ca. 1 cm Absackung pro 1000 Jahre bezeichnet.

2. Methoden

Probennahme

Das Untersuchungsgebiet steht unter Naturschutz und ist nicht leicht zugänglich. Daher wurden für die Geländearbeit leicht transportierbare Geräte verwendet. Die Bohrungen im Uferbereich wurden mit einem benzinbetriebenen Bohrhammer Modell „Copra Combi“ durchgeführt. Mit diesem wurden Rammsonden in den Boden getrieben und anschließend mit einem benzinbetriebenen hydraulischen Ziehgerät wieder aus dem Untergrund gehoben. Der so gewonnene Sedimentkern kann vor Ort untersucht oder für spätere Untersuchungen konserviert werden (Abb. 6).



Abbildung 6: Mit Sediment gefüllte Sonden nach offenen Bohrungen. Oberer Bohrkern zur Sedimentansprache präpariert. Photo aus von Harten, 2014 (unveröffentlicht) von Tabea Schröder.

Die Sonden sind hohle Metallrohre von einem Meter Länge, in deren Inneren sich das Sediment sammelt. Um größere Tiefen zu erreichen, können die Sonden mit zusätzlichen Metallstangen, die ebenfalls eine Länge von einem Meter haben, verlängert werden. Hierzu wird die geleerte Sonde erneut in das nun vorhandene Loch abgeteuft. Danach wird die Verlängerungsstange angeschraubt und die Sonde weiter in den Untergrund getrieben. Diese

Schritte können wiederholt werden. Im Zuge der Bohrkampagne wurden so an Land Tiefen von bis zu 12 m sondiert.

Der Boden im Uferbereich der Laguna de Medina war teilweise stark wassergesättigt, was zu instabilen Bohrlöchern führte. Da die Wände des Bohrlochs bei diesem Bohrverfahren nicht gestützt werden, kann lockeres Sediment in das Bohrloch nachfallen. Geschieht dies, wird der Teil des Bohrkerns, der als Nachfall identifiziert werden kann, entfernt. Die Bohrkerns sind somit teils kürzer als die Bohrtiefe erwarten lässt. Die Tiefen der Bohrkerns wurden daher angepasst, indem die Bohrkerns in entsprechender Tiefe neu angeordnet wurden und somit eine Lücke in der Stratigrafie im unteren Bereich des Bohrkerns entsteht.

Um einen Überblick über die Beschaffenheit des Untergrundes zu erlangen und somit Aussagen über die Relevanz des gewählten Bohrstandortes für die Fragestellung der Felduntersuchung treffen zu können, wurden zunächst offene Bohrungen durchgeführt. Dazu wurde das beschriebene Verfahren angewendet und der Sedimentkerne direkt in die Sonde getrieben. Nach dem Ziehen wurden diese Bohrkerns in situ bodenkundlich grob untersucht und in Text und Bild dokumentiert. Stellte sich der Standort als geeignet heraus, wurde zusätzlich eine geschlossene Bohrung durchgeführt, um die Sedimentkerne bestmöglich für spätere detailliertere Analysen zu konservieren. Hierzu wurden vor dem Bohrvorgang sogenannte „Liner“ in die Sonden gesetzt. Diese Liner sind hohle Plastikrohre, die nach dem Bohren der Rammsonde entnommen werden können und den Sedimentkern enthalten. Nach dem Ziehen der Sonde wurden die so gewonnenen Proben in den Linern luftdicht verschlossen und nach Köln transportiert. Dort wurden sie bis zur finalen Untersuchung in einem Kühlraum gelagert.

Abbildung 7 zeigt ein Satellitenbild des Sees Laguna de Medina, auf dem die verschiedenen Bohrungen mit den jeweiligen Tiefen eingetragen sind. Neben den in dieser Arbeit analysierten Sedimentkernen der Bohrungen LML1, LML2 und LML3 ist die Hauptbohrung in der Seemitte zu sehen, welche von einer Plattform getätigt wurde und vier weitere offene Bohrungen.

Zusätzlich zu den Bohrungen wurden um den gesamten See verteilt Oberflächenproben genommen, die in Abbildung 7 dokumentiert sind. Die Entnahmetiefe betrug in etwa 20 cm von der Geländeoberkante. Anhand dieser Proben sollen die aktuellen Bodenbeschaffenheiten bestimmt und die Genauigkeit der geologischen Karte der Region, die vom Instituto

Geológico y Minero de España 1984 herausgegeben wurde und auf der die geologische Übersicht des Einzugsgebietes (Abb. 5) basiert, verifiziert werden.

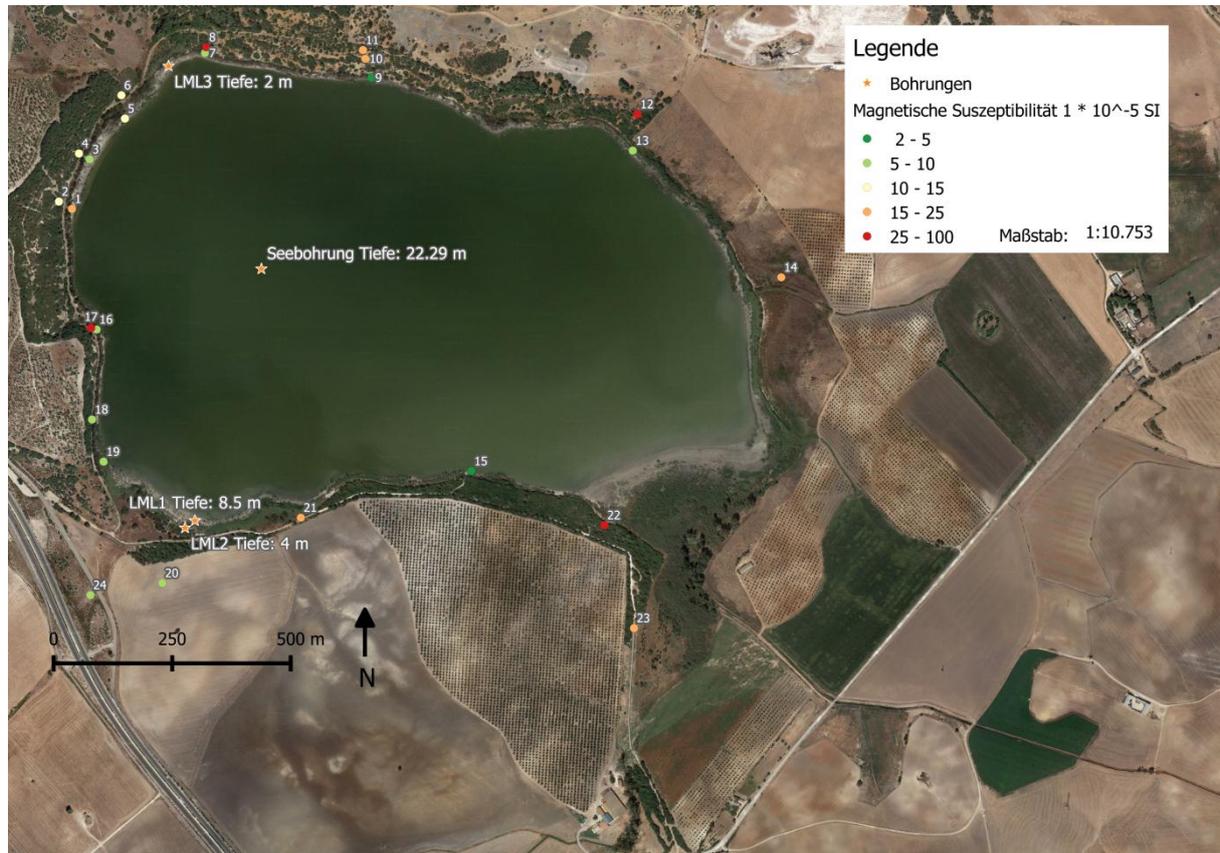


Abbildung 7: Karte der Bohrungen und Oberflächenproben. Laguna de Medina (modifiziert nach Google Maps, 2015). Vergrößerte Version siehe Anhang 6.

Häufig wurden Probenpaare in einem gewissen Abstand zueinander entnommen, um nicht repräsentative Befunde auszuschließen. Die Proben wurden vor Ort bodenkundlich eingeordnet und für spätere Untersuchungen luftdicht verpackt. Aufgrund des örtlich teilweise sehr dichten Bewuchses konnten nicht alle Uferbereiche beprobt werden. Besonders im östlichen Bereich des Sees war eine Entnahme in Ufernähe nicht möglich.

Untersuchung der Proben

In den Laboratorien der Universität zu Köln wurden die gewonnenen Proben mit unterschiedlichen Methoden untersucht. Die Liner der geschlossenen Bohrungen wurden mit einer Bohrkernsäge der Länge nach halbiert. Anschließend wurden die Bohrkerns mit einer hochauflösenden Kamera fotografiert und die Stratigraphie der Sedimentschichten beschrieben. Hierbei wurde als Leitlinie die „Anleitung zur makroskopischen Beschreibung von Bohrkernen im Gelände Oktober 2010“ verwendet (Kehl, 2010, unveröffentlicht).

Um die erbohrten Sedimentkerne näher zu charakterisieren, wurde deren magnetische Suszeptibilität gemessen.

Magnetische Suszeptibilität

Die magnetische Suszeptibilität ist eine physikalische Stoffeigenschaft. Sie ist ein Maß für die Magnetisierbarkeit eines Stoffes in Abhängigkeit von einem externen temporären magnetischen Feld. Setzt man einen Stoff einem Magnetfeld H der Stärke 1 A m^{-1} aus, so wird eine Magnetisierung J mit 1 V s m^{-2} induziert, die proportional zur Feldstärke ist. Der Proportionalitätsfaktor ist die magnetische Suszeptibilität (Pirring, 2013).

Ursache für die Magnetisierbarkeit von Materialien ist deren magnetische Polarisierbarkeit.

Diese lässt sich auf das Zusammenwirken der Rotation der negativ geladenen Elektronen um den positiv geladenen Atomkern und der Eigenrotation der Elektronen zurückführen, wodurch ein magnetisches Dipolmoment verursacht wird (siehe Abbildung 8). Die Summe der einzelnen Dipolmomente der Atome, aus denen die Stoffe aufgebaut sind, führt zu deren makroskopischen magnetischen Eigenschaften.

Man unterscheidet fünf verschiedene Arten von Magnetisierung, die auf der Elektronenkonfiguration und beim Ferromagnetismus, Antiferromagnetismus und Ferrimagnetismus zusätzlich auf der Struktur des Kristallgitters basieren (Sandgren & Snowball, 2001).

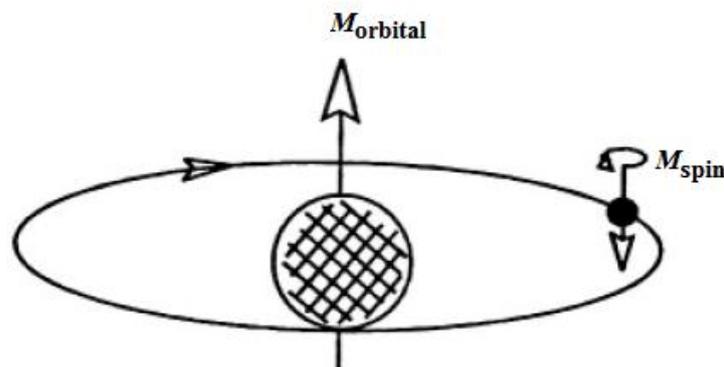


Abbildung 8: Magnetisches Moment eines Atoms (Aus Sandgren & Snowball, 2001 nach Tarling, 1971).

Diamagnetismus

Bei diamagnetischen Stoffen, die kein magnetisches Moment besitzen, erzeugen die Elektronen beim Einschalten eines äußeren magnetischen Feldes ein diesem entgegengerichtetes magnetisches Feld. Daraus resultiert ein negatives magnetisches Moment; die magnetische Suszeptibilität ist schwach negativ. Materialien, die diamagnetische Eigenschaften aufweisen, enthalten kein Eisen. Diamagnetische Minerale sind Quarz,

Feldspat, Calcit (Sandgren & Snowball, 2001). Außerdem sind organische Stoffe und Wasser ebenfalls diamagnetisch (Dearing, 1999).

Paramagnetismus

Paramagnetische Stoffe weisen permanente atomare magnetische Momente auf, die durch ungepaarte Elektronen verursacht werden. Ohne externes Magnetfeld kompensieren sich die magnetischen Momente der Atome, da sie gleichmäßig in alle Raumrichtungen orientiert sind. Daher ist die Magnetisierung ohne externes Feld gleich Null. In einem von außen angelegten Magnetfeld richten sich die atomaren Permanentmomente so aus, dass sie eine Verstärkung des Feldes bewirken und damit zu einer schwachen Erhöhung der Suszeptibilität führen. Paramagnetismus ist temperaturabhängig. Er tritt bei vielen eisenhaltigen Mineralen auf, z. B. Olivin, Pyroxen, Biotit, Granat, eisen- und manganhaltige Carbonate (Sandgren & Snowball, 2001).

Ferromagnetismus

Das magnetische Verhalten ferromagnetischer Stoffe beruht nicht nur auf den magnetischen Eigenschaften der einzelnen Atome, sondern zusätzlich auf der Kristallgitterstruktur (Bruhn, 1967). In ferromagnetischen Stoffen sind die ungepaarten Elektronen regelmäßig und eng aneinander angeordnet. Durch die starke Kopplung der Elektronen liegt in einzelnen Gitterbereichen, den Weisschen Bezirken, eine parallele gleichsinnige Orientierung der magnetischen Momente der Atome vor (Abb. 9; Bruhn, 1967). Da benachbarte Bereiche in entgegen gesetzter Orientierung vorliegen können, kompensieren sich die Wirkungen der Bezirke im makroskopischen Bereich, so lange kein externes magnetisches Feld angelegt ist. Wird ein Magnetfeld eingeschaltet, so wachsen die bevorzugten Weisschen Bezirke und bleiben auch beim Abschalten des äußeren Feldes vorhanden, so dass eine Magnetisierung erhalten bleibt. Oberhalb einer kritischen Temperatur (Néel-Temperatur) wird die Gitterordnung zerstört, die ferromagnetischen Eigenschaften verschwinden und der Stoff erscheint paramagnetisch. Zu den ferromagnetischen Stoffen gehören Eisen, Cobalt, Nickel (Sandgren & Snowball, 2001).

Antiferromagnetismus

Ein Spezialfall des Ferromagnetismus liegt bei den antiferromagnetischen Substanzen vor, die zwar nach außen diamagnetisch erscheinen, aber spontan magnetisierbar sind. Hier sind die einzelnen magnetischen Momente so gekoppelt, dass Teilbereiche in der Kristallstruktur antiparallel ausgerichtet sind (Abb. 9). Erst beim Einschalten eines Magnetfeldes lassen sie sich in Richtung des Feldes magnetisieren. Sind die Untergitter der Kristallstruktur nicht

exakt antiparallel ausgerichtet, so spricht man von verkantetem Antiferromagnetismus (Abb. 9). Stoffe, die diese Gitterstruktur aufweisen, besitzen ein magnetisches Restmoment und können daher Träger einer remanenten Magnetisierung sein. Zu den antiferromagnetischen Mineralen gehören Hämatit und Goethit (Sandgren & Snowball, 2001).

Ferrimagnetismus

Bei den ferrimagnetischen Stoffen sind die magnetischen Momente nicht genau antiparallel ausgerichtet oder die parallel und antiparallel ausgerichteten Kristallbereiche sind nicht gleich dimensioniert (Pirring, 2013). Beide Anordnungen der magnetischen Momente führen auch ohne äußeres Feld zu einer spontanen Magnetisierung. Oberhalb der Néel-Temperatur verhalten sie sich wie paramagnetische Stoffe. Ferrimagneten bewirken eine stark bis sehr stark positive magnetische Suszeptibilität (Pirring, 2013). Aufgrund ihrer starken Magnetisierung beeinflussen die in einem mineralischen Zusammenschluss enthaltenen ferrimagnetische Minerale dessen magnetische Eigenschaften besonders stark. Ein häufig vorkommendes ferrimagnetisches Mineral ist der Magnetit (Sandgren & Snowball, 2001).

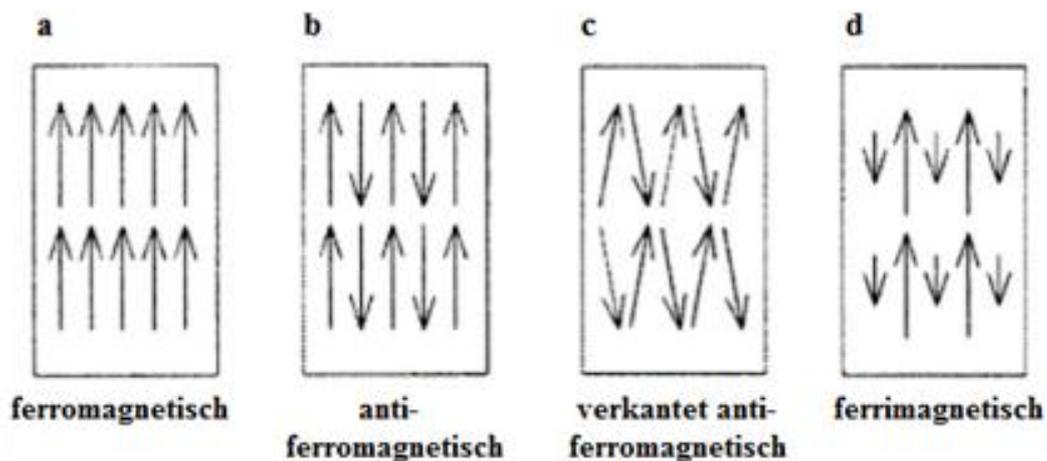


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Magnetisierungsvektoren in a) ferromagnetischen, b) antiferromagnetischen, c) verkantet antiferromagnetischen und d) ferrimagnetischen Stoffen (Aus Sandgren & Snowball, 2001 nach McElhinny, 1973).

Messung magnetischer Suszeptibilität

Die Messung der magnetischen Suszeptibilität mit dem für die Untersuchung der Proben verwendeten Bartington MS2E System erfolgt, indem die Stärke der Magnetisierung in $A\ m^{-1}$ in Relation zu einem externen durch Wechselstrom erzeugten Magnetfeld von $\sim 80\ A\ m^{-1}$ ermittelt wird. Gemessen wird die volumenspezifische magnetische Suszeptibilität κ , deren Wert in SI-Einheiten angegeben wird (Dearing, 1999). Mithilfe der magnetischen Suszeptibilität können Stoffe aufgrund ihrer magnetischen Eigenschaften identifiziert, deren

Konzentrationen berechnet und magnetische Korngröße ermittelt werden (Sandgren & Snowball, 2001). Da die magnetische Suszeptibilität von Materialien aus der Summe der ferro-, antiferro-, ferri- und paramagnetischen Eigenschaften der Atome, aus der sie besteht resultiert, zeigen die unterschiedlichen Materialien je nach Zusammensetzung charakteristische Magnetisierungen in einem äußeren magnetischen Feld. Der Einfluss diamagnetischer Komponenten kann aufgrund der schwach negativen Wirkung vernachlässigt werden, außer die Proben bestehen fast vollständig aus Wasser, Quarz oder organischen Substanzen (Dearing, 1999).

Zur Messung unter Laborbedingungen muss man berücksichtigen, dass die verwendeten Sensoren in ihrer Messgenauigkeit durch magnetische Materialien, elektromagnetische Felder und durch Erschütterungen beeinträchtigt werden. Temperaturschwankungen wirken ebenfalls störend, eine niedrige und konstante Raumtemperatur stellt optimale Messbedingungen dar (Dearing, 1999).

Untersuchung von See-Sedimenten

In Sedimente von hydrologisch abgeschlossenen salinen Seen in semi-ariden Regionen findet sich eine Vielzahl biotischer und abiotischer Rückstände, aus denen man auf regionale paläoklimatische Veränderungen (z. B. Verdunstung, Niederschlag, Temperatur) schließen kann (Thompson & Oldfield, 1986). Mithilfe sedimentologischer Untersuchungen können Schwankungen des Wasserstandes ermittelt werden, die eindeutig in Beziehung zu Niederschlags- und Verdunstungsraten gesetzt werden können. Die Schwankungen des Wasserstandes führen zu wechselnder Salinität und Variationen in der Zusammensetzung der Sole. Dies wirkt sich aus auf die Artenvielfalt des Gewässers und auf die Mineralogie und die Geochemie des Sediments. Damit bieten lakustrine Sedimente eine potenzielle Vielzahl von Klima-Proxies (Reed, 2001).

Die Seen werden meist aus gut definierbaren Einzugsgebieten gespeist. Aus diesen Gebieten werden durch Erosion des Muttergesteins, des Unter- und des Oberbodens unterschiedliche Minerale abgetragen und durch fluviatile und auch äolische Prozesse in die Seen eingetragen und als Sediment abgelagert (Thompson & Oldfield, 1986). Ein Austrag von Mineralien aus dem Seebecken erfolgt nicht, da es hydrologisch abgeschlossen ist. Da die Seesedimente aufgrund umweltbedingter Einträge und Ablagerungen unterschiedliche Mineralien mit jeweils charakteristischem magnetischen Verhalten enthalten, die u.a. in ihren Korngrößen und Konzentrationen variieren, kann mithilfe der magnetischen Suszeptibilität der im

Sediment vorkommenden Minerale auf geologische Prozesse, die den Eintrag beeinflusst haben können, rückgeschlossen werden.

Die Anwendung von Messungen der magnetischen Suszeptibilität bei der Erforschung zurückliegender Umwelteinflüsse und –prozesse geht zurück auf die Untersuchungen von Thompson, Batterbee, O'Sullivan & Oldfield (1975), die den Zusammenhang von hohen Messwerten mit der durch Abholzung von Wäldern auftretenden Bodenerosion erforschten. Die unterschiedlichen Messwerte der magnetischen Suszeptibilität konnten als Indikatoren für das Ausmaß der Erosion genutzt werden. Während der 70er und 80er Jahre wurde das enorme Potenzial der Methode erkannt, so dass sie heute zu den Standardanalyseverfahren von Sedimentproben gehört. Dies liegt unter anderem daran, dass die Messungen an allen Materialien sicher, schnell und zerstörungsfrei durchgeführt werden können. Darüber hinaus ist das Verfahren sowohl im Labor als auch bei der Feldarbeit ausführbar (Sandgren & Snowball, 2001).

Die Aufnahmen können für die Korrelation verschiedener Sedimentkerne des gleichen Untersuchungsortes genutzt werden oder um Sammelprofile ohne Datenlücken zu erstellen. Auch eine Korrelation von Sedimentkernen und Sammelprofilen unterschiedlicher Untersuchungsorte ist möglich (Nowaczyk, 2001).

Messung der magnetischen Suszeptibilität an Sedimentkernen

Die magnetische Suszeptibilität kann sowohl an ungeöffneten Sedimentkernen („whole-core logging“) als auch an longitudinal halbierten Kernen („split-core logging“) und an einzelnen Proben nicht-invasiv bestimmt werden.

Um die magnetische Suszeptibilität am halbierten Sedimentkern zu messen, wird hierbei ein so genannter spot-reading-Sensor über die gespaltene Oberfläche des Kernprofils bewegt. Diese wird vor der Messung mit einer dünnen Plastikfolie abgedeckt, welche mit wenig demineralisiertem Wasser benetzt wird, damit der Sensor über die Probe gleiten kann, ohne dabei kontaminiert zu werden. Da sich die Sensitivität des Sensors exponentiell verringert im Vergleich zur Distanz zur Probe, muss er komplett auf der Oberfläche des Sedimentkerns bzw. der Folie aufliegen. Bei der Vorbereitung des Kerns ist darauf zu achten, dass die Probe weder von außerhalb noch durch ein Verschmieren des Sedimentes auf der Oberfläche (z.B. beim Zerteilen) kontaminiert wird (Nowaczyk, 2001).

Da bei der „split-core logging“-Methode nur ein kleiner Teil des Kernmaterials gemessen wird, ist die entstandene Aufzeichnung bei Sedimentproben, die hohe horizontale

Inhomogenitäten aufweisen und auch bei Störungen, Verformungen oder Brüchen, die während der Bohrung entstehen können, nicht repräsentativ (Nowaczyk, 2001). Andererseits bietet die Methode gerade im Vergleich zur „whole-core logging“-Methode, bei der der Sedimentkern in seinem Umfang um die Längsachse erhalten bleibt und durch einen sogenannten loop-Sensor vermessen wird, eine höhere räumliche Auflösung. Außerdem können halbierte Kerne vorselektiert werden und somit z.B. verzerrte Bohrkernabschnitte aussortiert werden. Des Weiteren liefern spot-reading-Sensoren im Vergleich zu loop-Sensoren deutlich bessere Messergebnisse zu den seitlichen Grenzen des Bohrkerns hin, so dass „Edge“-Effekte, die das Abfallen der magnetischen Suszeptibilität an den Rändern der Probe bedeuten, minimiert werden (Nowaczyk, 2001).

Messung der magnetischen Suszeptibilität an den Bohrkernen der Laguna de Medina

Die präsentierten Daten wurden mit dem Sensor MS2E gemessen, weil er sich besonders für frische Sedimentkerne in Plastikhüllen eignet. Seine räumliche Auflösung beträgt 3,8 mm x 10,5 mm. (Dearing, 1999).

Zur Bohrkernanalyse wurde ein „Multi-Sensor Core Logger“ (MSCL) der Firma Geotek verwendet, mithilfe dessen die Bohrkernabschnitte automatisiert im „split-core logging“-Verfahren in Schritten von einem Zentimeter mit gemessen wurden. Abbildung 10 zeigt, wie das Gerät einen präparierten Bohrkern analysiert. Die Proben wurden bei Raumtemperatur gemessen. Die verwendeten Einstellungen können Anhang 1 entnommen werden. Die Messung der magnetischen Suszeptibilität erfolgte volumenbezogen und liefert einheitslose Messwerte.

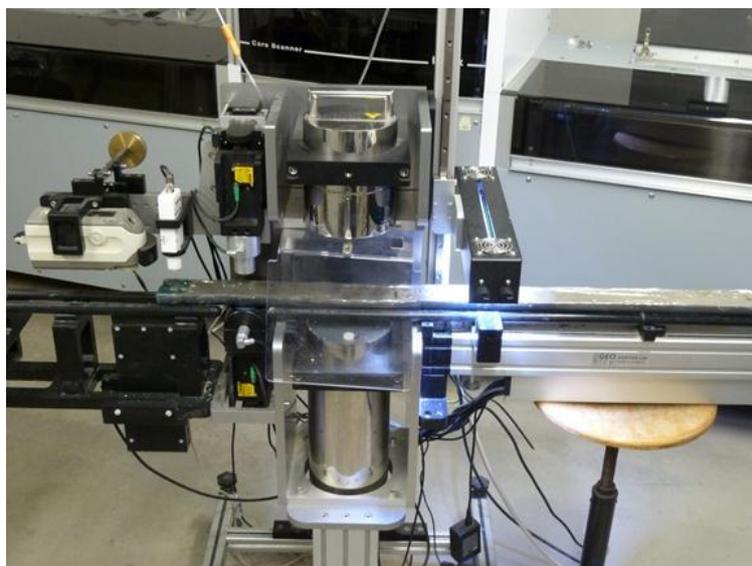


Abbildung 10: Der Multi-Sensor Core Logger (MSCL) der Firma Geotek an der Universität zu Köln. Photo von Daniel H. Pflieger.

Messung der magnetischen Suszeptibilität der Oberflächenproben

Die Oberflächenproben wurden mit dem Handgerät MS2 der Firma Bartington mit dem MS2K-Sensor gemessen. Jede Probe wurde zehnmal vermessen und anschließend der Mittelwert der Messungen gebildet.

Datenanalyse

Die Messdaten wurden mit Python 3 und den Programm-Bibliotheken matplotlib, pandas und numpy dargestellt.

Um den Verlauf des Messgraphen eindeutig sichtbar zu machen, wurden die Achsenabschnitte der Diagramme der unterschiedlichen Bohrungen gleichgesetzt. Die Abszisse ist auf einen maximalen Wert von $\text{Kappa} = 20 \times 10^{-5}$ begrenzt. Dies hat zur Folge, dass einige Höchstwerte nicht dargestellt werden. Im Anhang befinden sich Diagramme, die den vollen Wertebereich zeigen (Anhang 3, 4 & 5).

Die Bodenarten sind nach Kehl (2010, unveröffentlicht) beschrieben. In Anhang 2 befindet sich das Bodendreieck, das die Bodenarten nach Anteilen an Sand, Silt und Ton kategorisiert.

3. Ergebnisse

Die Stratigraphie und die magnetische Suszeptibilität der untersuchten Bohrkerne ist in Abbildung 11 (LML1), Abbildung 12 (LML2) und Abbildung 13 (LML3) dargestellt. Die weißen Bereiche in der Stratigraphie und Unterbrechungen im Verlauf des Graphen der magnetischen Suszeptibilität zeigen Stellen, an denen die Bohrkerne um nachgefallenes Material verkürzt werden mussten. Somit stehen für diese Bereiche keine Messdaten zur Verfügung. Die waagerechten gestrichelten Linien im Koordinatensystem der magnetischen Suszeptibilität entsprechen den einzelnen Bohrkernabschnitten. An deren Grenzen und an Stellen, an denen es zu Kernverlusten kam, fällt die magnetische Suszeptibilität aufgrund des Edge-Effektes teilweise stark ab.

Die beiden Bohrungen am südlichen Ufer (LML1 und LML2), die im Bereich eines Zuflusses zum See liegen (siehe Abbildungen 5 und 7), weisen im Mittel im Vergleich zur Bohrung am nördlichen Ufer (LML3) höhere Werte der magnetischen Suszeptibilität auf.

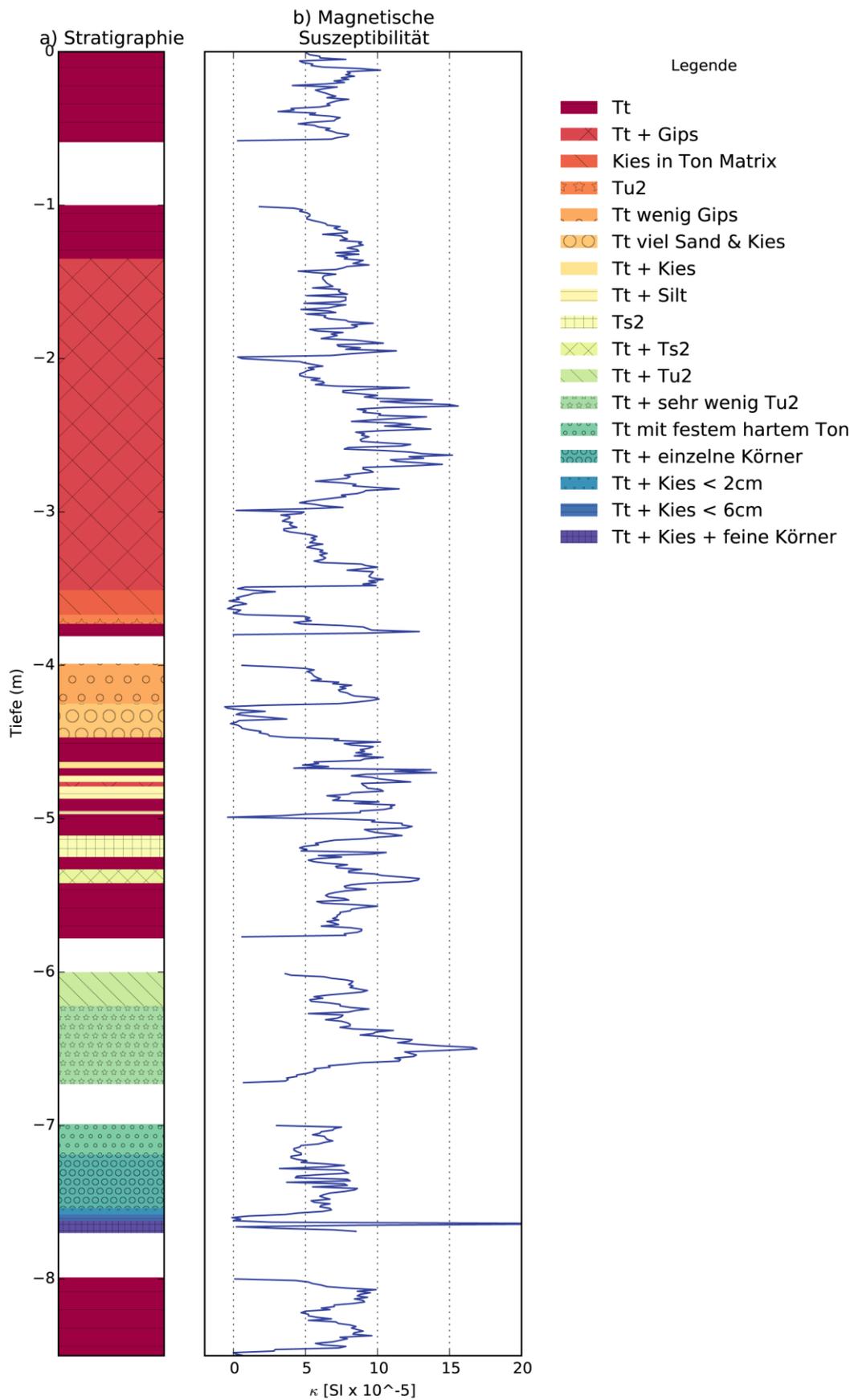


Abbildung 11: Bohrung LML1, Stratigraphie und magnetische Suszeptibilität des Sedimentkerns.

LML1

Das Profil der Bohrung LML1, das in Abbildung 11 zu sehen ist, setzt sich aus neun Teilstücken zusammen und erreicht inklusive der Lücken von 1,41 m eine Gesamtmächtigkeit von 8,5 m. Der Sedimentkern ist primär durch Tt Horizonte geprägt. Diese enthalten einen Anteil an Ton von 65 % - 100 %, der hier zum Teil in Verbindung mit Kies und Gips auftritt. Einzig in einer Tiefe von 3,68 m – 3,73 m findet sich eine Lage Tu2, bei der neben dem Ton auch der Silt-Gehalt hoch ist und in einer Tiefe von 5,12 m – 5,25 m eine Schicht Ts2, die neben 45 % – 65% Ton auch 20 % - 55% Sand enthält. Eine weitere Besonderheit ist ein 16 cm mächtiges Band aus Kies, das in einer Tiefe von 3,52 m in einer Tonmatrix liegt. Im Bereich 4,5 m - 5 m wechseln sich relativ dünne wenige Zentimeter mächtige Lagen von Tt und Tt mit Kies, Gips oder Silt Einlagerungen ab. Es gibt zwei weitere Kiesvorkommen, eins im Bereich von 7,55 m – 7,57 m mit einer Korngröße von max. 2 cm, das andere im Bereich von 7,58 m – 7,62 m, wo die maximale Korngröße des Kieses 6 cm beträgt.

Die magnetische Suszeptibilität schwankt je nach Bodenart und auch innerhalb der Schichten und überschreitet an den meisten Stellen 5×10^{-5} . Tiefstwerte werden in Bereichen mit einem hohen Anteil an Kies und Sand erreicht. In einer Tiefe von 4,27 m beträgt der absolute Tiefpunkt $-0,6 \times 10^{-5}$. Auch die Bereiche des Kiesbandes bei 3,52 m – 3,67 m und des groben Kieses bei 7,58 m – 7,62 m weisen negative Suszeptibilitäten auf.

Der Höchstwert von $25,8 \times 10^{-5}$ wird bei 7,64 m in einer Tt-Schicht erreicht, die feine Körner und wenig Kies enthält. Ein weiterer deutlicher Peak mit einer magnetischen Suszeptibilität von $16,9 \times 10^{-5}$ befindet sich in einem Tt Horizont, der wenige Tu Anteile beinhaltet, bei einer Tiefe von 6,5 m.

LML2

Die Länge des in Abbildung 12 dargestellten Bohrprofils der LML2 Bohrung beträgt 3,62 m, beinhaltet Lücken von 0,43 m und ist aus vier Teilstücken zusammengesetzt. Die Stratigraphie besteht aus unterschiedlichen Bodenarten, wobei die stark tonigen Tt-Horizonte den Großteil des Volumens ausmachen. Daneben treten besonders auf den ersten 0,5 m Sand und Silt dominierte Sedimente auf.

Je nach Sedimentart schwankt die magnetische Suszeptibilität; auch innerhalb der Sedimentlagen unterliegt sie einer ständigen Variation. Es ist zu beobachten, dass die magnetische Suszeptibilität auf den ersten 0,38 m in den sandigen und schluffigen Sedimenten im Schnitt deutlich unter der Suszeptibilität der Ton dominierten Bereiche liegt,

die in größeren Tiefen zu finden sind. Eine besonders hohe magnetische Suszeptibilität wurde im Ss / Su2 Horizont in einer Tiefe von 0,4 m gemessen. Der Wert von $165,5 \times 10^{-5}$ ist mit Abstand der höchste an den untersuchten Bohrkernen gemessene Wert. Die magnetische Suszeptibilität steigt hier von $9,9 \times 10^{-5}$ bei 0,39 m rapide auf den oben genannten Wert an und fällt bei einer Tiefe von 0,41 m wieder auf $10,2 \times 10^{-5}$. Der niedrigste Wert, der in diesem Bohrprofil in einer Tiefe von 0,03 m gemessen wurde, beträgt $0,6 \times 10^{-5}$.

Der 5 cm mächtige Lt3 Horizont in einer Tiefe von 2 m im Bohrprofil besteht aus nachgefallenem Material, dass vor der Messung nicht vollständig entfernt wurde.

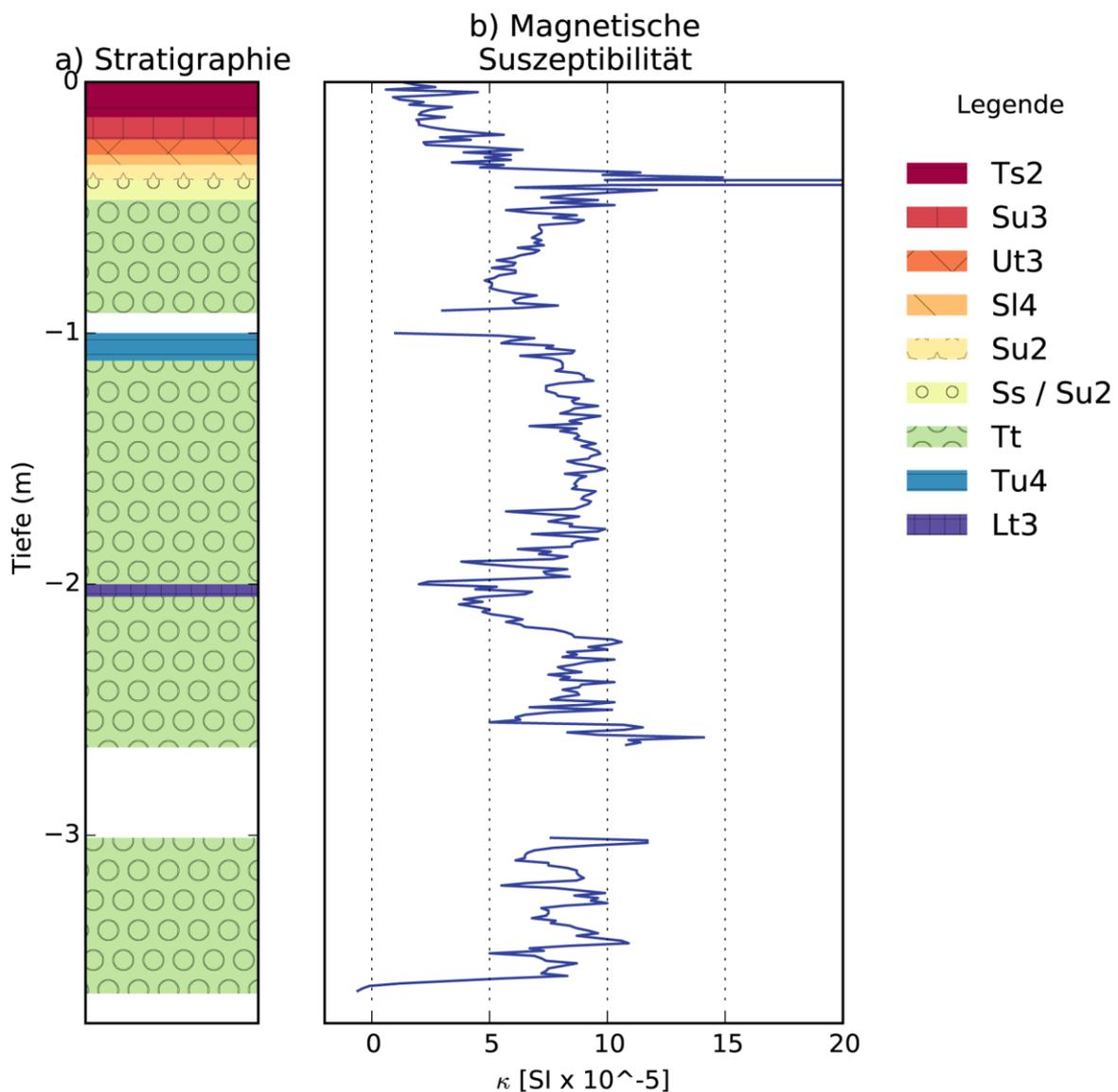


Abbildung 12: Bohrung LML2, Stratigraphie und magnetische Suszeptibilität des Sedimentkerns.

LML3

Bei der Bohrung LML3 wurde mit 1,91 m die geringste Tiefe erreicht. Der Bohrkern besteht aus zwei Teilstücken und weist eine Lücke von 0,49 m auf. Wie in Abbildung 13 zu sehen ist, wird das Profil durch sandige Sedimente dominiert.

Die magnetische Suszeptibilität ist an vielen Stellen in den Sedimentlagen der Su2 und SI2 Horizonte negativ. Der geringste Wert von $-0,6 \times 10^{-5}$ wurde in einer Tiefe von 1,38 m gemessen. In der T1 Schicht erreicht die magnetischen Suszeptibilität bei 0,25 m Tiefe einen Höchstwert von $7,1 \times 10^{-5}$.

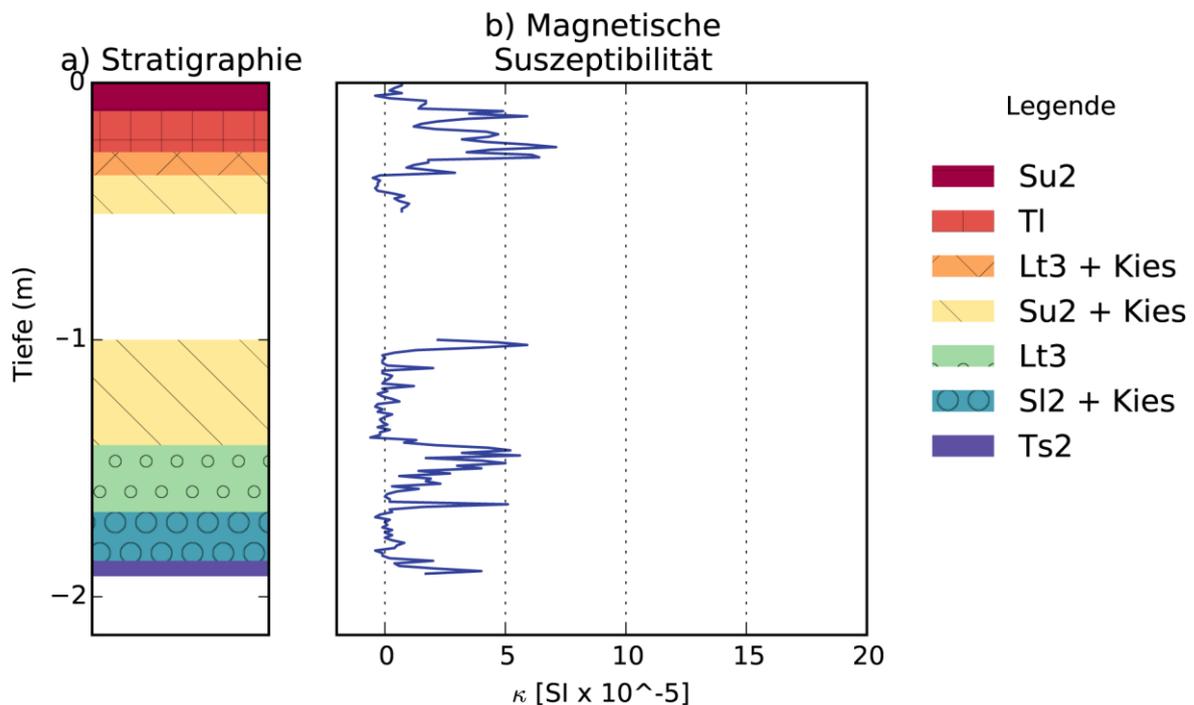


Abbildung 13: Bohrung LML2, Stratigraphie und magnetische Suszeptibilität des Sedimentkerns.

Oberflächenproben

Die Messergebnisse sind in Abbildung 7 und Tabelle 1 dargestellt. Es fällt auf, dass sich die magnetische Suszeptibilität erhöht je größer die Distanz zum Seeufer ist, besonders wenn man Probenpaare wie z.B. Probe 3 und 4 oder Probe 7 und 8 betrachtet. Der höchste gemessene Wert beträgt $84,5 \times 10^{-5}$ bei Probe 17 am Westufer; der niedrigste Wert mit einer magnetischen Suszeptibilität von 2×10^{-5} findet sich bei Probe 15 am südlichen Ufer.

Tabelle 1: Magnetische Suszeptibilität der Oberflächenproben.

Probennummer	Magnetische Suszeptibilität in 1×10^{-5} [SI]
1	21,3
2	12,7
3	5,3
4	13,8
5	10,3
6	10,3
7	5,1
8	59,3
9	3,7
10	18,7
11	17
12	76,5
13	8,7
14	19,8
15	2
16	9,7
17	84,5
18	7,2
19	7,3
20	7,9
21	24,3
22	28,6
23	23,1
24	8

4. Interpretation

Der Wechsel in der Stratigraphie und die schwankenden Messwerte der magnetischen Suszeptibilität sprechen für die Variation der Intensität geologischer Prozesse über die Zeit der Sedimentation (Stockhausen & Zolitschka, 1999). Je homogener eine Sedimentschicht ist, desto stärker ist die Aussagekraft der Schwankungen der magnetischen Suszeptibilität, da grundsätzlich in gleichen Materialien auch konstante Suszeptibilitäten erwartet werden können. So sprechen zum Beispiel die starken Variationen der magnetischen Suszeptibilität innerhalb des Tt Horizontes (LML1 0 m – 0,58 m) und des Tt + Gips Horizontes (LML1 1,36 m – 3,51 m) deutlich für wechselnde Umwelteinflüsse, die sich in der Sedimentation manifestiert haben.

An den Grenzen der Bohrkernabschnitte geht die magnetische Suszeptibilität aufgrund des Edge-Effektes gegen null. Die Kernverluste, die bei allen Bohrungen auf dem ersten Meter vorkamen, liegen in der Kompression des locker gelagerten Oberbodens begründet.

Die magnetische Suszeptibilität der Sedimente der auf der Südseite gelegenen Bohrungen LML1 und LML2 ist höher als bei LML3, da sich in unmittelbarer Nähe zu diesen ein Zufluss befindet (siehe Abbildungen 5 und 7). Laut Thompson und Oldfield (1986) ist in diesen Bereichen durch den Eintrag von allochthonem Material grundsätzlich mit höheren Werten zu rechnen.

Die Orte der Bohrungen LML1 und LML2 wurden dicht beieinander gewählt, um einerseits zufällige lokale Sedimentationsereignisse auszuschließen, indem beide Bohrungen miteinander korreliert werden und andererseits, um die Verteilung der Sedimente sowohl vom See nach außen als auch in die entgegengesetzte Richtung zu prüfen. Anhand der ermittelten Stratigraphie und der magnetischen Suszeptibilität der Sedimente lässt sich hier jedoch kein Muster erkennen, das eine Korrelation ermöglicht.

Erhöhte magnetische Suszeptibilitäten in den Sedimentschichten mit hohem Gehalt an Silt und Ton, besonders in den Bohrungen LML1 und LML2 sind auf das Vorkommen antiferromagnetischer Minerale zurückzuführen (Sandgren & Snowball, 2001; Dearing, 1999). Der Höchstwert von $165,5 \times 10^{-5}$ im Ss / Su2 Horizont der LML2 Bohrung in einer Tiefe von 0,4 m ist für eine sandreiche Schicht untypisch. Er kann als Hinweis auf ferro- oder ferrimagnetische Stoffe gedeutet werden. Das vermehrte Auftreten negativer Messwerte der magnetischen Suszeptibilität bei Bohrung LML3 liegt im hohen Sandgehalt der Sedimente begründet. Der enthaltenen Quarz ist diamagnetisch, so dass die magnetische Suszeptibilität unter null fällt (Dearing, 1999).

Die Erhöhung der magnetischen Suszeptibilität mit zunehmender Tiefe innerhalb einer Schicht in Bohrabschnitten mit Kernverlust wie in Abschnitten 3 m – 4 m, 6 m – 7 m von Bohrung LML1 und im Bereich 2 m – 3 m von Profil LML2 kann durch die Komprimierung des Sediments verursacht worden sein (Glew, Smol & Last, 2001).

Die gemessene magnetische Suszeptibilität der Oberflächenproben lässt ohne eine bodenkundliche Analyse dieser Proben keine direkte Schlussfolgerung auf vorhandene Gesteine zu. Bei schlecht sortierten Proben schwankten die Messwerte so sehr, dass die Mittelwerte in vielen Fällen kein repräsentatives Bild der Sedimentarten zeigen.

5. Diskussion

Das Ziel der Arbeit, die Beschreibung der Sedimentkerne der Uferbohrungen als Grundlage weiterer Untersuchungen, wurde im Rahmen der angewendeten Methoden erreicht. Eine Korrelation der Bohrkerne untereinander wäre wünschenswert, um die Zusammenhänge der Ufersedimente besser zu verstehen, konnte aber anhand der vorhandenen Daten nicht hergestellt werden. Verschiedene Faktoren beeinträchtigen die Korrelation.

Zum einen wurde bei der Aufbereitung der Proben davon ausgegangen, dass im Falle einer Verunreinigung der Probe durch in das Bohrloch nachgefallenes Material, dieses bei der Sondierung zu gleichem Teil Sediment aus der Rammsonde verdrängt. Als Beispiel sei der Fall genannt, dass sich bei der Untersuchung eines Horizontes bereits 20 cm nachgefallenes Material in der Sonde befinden. Wird die Sonde nun für 100 cm in den Boden getrieben, füllt sie sich nur mit 80 cm Sediment. Da bei den Analysen davon ausgegangen wurde, dass dieses Sediment den ersten 80 cm des Bohrkernabschnittes entspricht, wurden die verunreinigten 20 cm als linearer Kernverlust beschrieben und als Lücke in der Stratigraphie dargestellt. Laut Glew et al. (2001) erfährt jedoch der Sedimentkern eine Verdichtung, so dass die 80 cm ein gestauchtes Bild des gesamten Bohrabschnittes von 100 cm widerspiegeln. Verunreinigte Sedimentkerne hätten somit in der Darstellung der Stratigraphie und der magnetischen Suszeptibilität entzerrt werden müssen.

Des Weiteren kann die Messung der magnetischen Suszeptibilität inhomogener Schichten bei dem verwendeten split-core-logging Verfahren zu einem undifferenzierten Bild der Sedimentschicht führen. Besonders in Schichten, in denen ein Gemisch aus verschiedenen Komponenten mit stark unterschiedlichem Körnungsgrad und jeweils differierenden magnetische Suszeptibilitäten vorliegt, besteht aufgrund des geringen Aufnahmebereichs des point-sensors die Gefahr, dass zufälligerweise entweder die relativ niedrigen Werte einer Komponente oder die möglicherweise viel höheren der anderen Komponente erfasst werden. Durch Messwiederholungen und die zusätzliche Messung mit einem loop-Sensor kann ein differenzierteres Bild der Sedimentproben entstehen.

Darüber hinaus kann die Erfassung der Lage der Bohrungen hinsichtlich der Höhe über dem Meeresspiegel eine Hilfe bei der Korrelation der Sedimentschichten bieten.

Dennoch bieten die ermittelten Daten eine Basis für weitere Analysen. Besonders in Verbindung mit der Ermittlung weiterer physikalischer Sedimenteigenschaften, wie der Dichte, der Sedimentfarbe und der Schalllaufzeit von p-Wellen sollte eine Korrelation der

untersuchten Bohrungen und der Hauptbohrung im See möglich sein (Pirrung, 2013). Um paläoklimatologische Antworten auf Fragen des C3-Projektes zu finden, müssen diese Daten dann um Messungen von Klimaproxies und Datierungsmethoden, wie z.B. palynologische Verfahren, dendrochronologische Analysen und Isotopenuntersuchung erweitert werden.

6. Fazit

Die Laguna de Medina bietet als paläoklimatologisches Untersuchungsgebiet gute Möglichkeiten. Es wird eine Vielzahl an unterschiedlichen Messverfahren benötigt, die in Korrelation zueinander gesetzt werden müssen, um definitive paläoklimatologische Aussagen treffen zu können. Die in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse können mit weiteren Daten kombiniert werden und sind somit eine mögliche Grundlage für weitere Untersuchungen.

Literaturverzeichnis

Ábalos, B., Carreras, J., Druguet, E., Escuder Viruete, J., Gómez Pugnaire, M. T., Lorenzo Álvarez, S., Quesada, C., Rodríguez-Fernández, L. R., Gil Iburguchi, J. I., (2002). Variscan and pre-Variscan tectonics. In: Gibbons, W., & Moreno, M. T. (Hrsg.), *The geology of Spain (S. 155 – 183)*. London: Geological Society.

Alonso-Zarza, A. M., Armenteros, I., Braga, J. C., Muñoz, A., Pujalte, V., Ramos, E., Aguirre, J., Alonso-Gavilán, G., Arenas, C., Baceta, J. I., Carballeira, J., Calvo, J. P., Corrochano, A., Fornós, J. J., González, A., Luzón, A., Martín, J. M., Pardo, G., Payros, A., Pérez, A., Pomar, L., Manuel, J., Villena, R., & Villena, J. (2002). Tertiary. In: Gibbons, W., & Moreno, M. T. (Hrsg.), *The geology of Spain (S. 293 – 334)*. London: Geological Society.

Bruhn, J. (1967). *Physik in Stichworten, Teilband 1: Mechanik und Wärmelehre, Elektrizitätslehre und Magnetismus*. Kiel: Verlag Ferdinand Hirt.

Casas-Sainz, A. M. & de Vincente, G. (2009). On the tectonic origin of the Iberian topography. *Tectonophysics*, 474, 214 – 235.

Cloetingh, S., Burov, E., Beekman, F., Andeweg, B., Andriessen, P. A. M., Garcia-Castellanos, D., de Vincente, G., & Vegas, R. (2002). Lithospheric folding in Iberia. *Tectonics*, 21, 1041, doi:10.1029/2001TC901031

Collaborative Research Centre 806 (2015a). *Our way to Europe: Introduction*. Abgerufen von <http://www.sfb806.uni-koeln.de/index.php/about?showall=1&limitstart=> (30. April 2015).

Collaborative Research Centre 806 (2015b). *Overview - Cluster C - Morocco / Iberia: The Western Mediterranean - Bridge or Barrier?*. Abgerufen von <http://www.sfb806.uni-koeln.de/index.php/projects/cluster-c> (30. April 2015).

Collaborative Research Centre 806 (2015bc). *Project C3: Climatic and Environmental Changes in the Upper Pleistocene – Middle Holocene of the Iberian Peninsula*. Abgerufen von <http://www.sfb806.uni-koeln.de/index.php/projects/cluster-c/C3> (30. April 2015).

Collaborative Research Centre 806 (2015d). *Coring campaign in Laguna de Medina and Laguna Salada, Cádiz, Southern Spain*. Abgerufen von <http://www.sfb806.uni-koeln.de/index.php/project-blog/174-c3/698-coring-campaign-in-laguna-de-medina-and-laguna-salada-cadiz-southern-spain> (30. April 2015).

Dearing J. (1999). *Environmental Magnetic Susceptibility - Using the Bartington MS2 System (Second edition)*. Kenilworth, UK: Chi Publishing.

Gibbons, W., & Moreno, M. T. (2002). *The geology of Spain*. London, UK: Geological Society.

Glew, J. R., Smol, J. P. & Last, W. M. (2001). Sediment core collection and extrusion. In Last, W. M. & Smol, J. P. (Hrsg.), *Tracking environmental change using lake sediments, Vol. 1: Basin analysis, coring, and chronological techniques* (S.73 - 106). Dordrecht, Niederlande: Kluwer Academic Publishers.

Google Maps (2015). [Laguna de Medina] [Satellitenkarte]. Abgerufen von Google.com (03.06.2015).

Gutiérrez, F., Calaforra, J. M., Cardona, F., Ortí, F., Durán, J. J., & Garay, P. (2008). Geological and environmental implications of the evaporite karst in Spain. *Environmental Geology*, 53, 951 – 965.

von Harten, J. (2014). *Exkursionsbericht zur Bohrkampagne in Spanien 2014: 5. -22. September 2014*. Unveröffentlicht, RWTH Aachen.

Janetschke, N., & Wilmsen, M. (2013). Magnetische Suszeptibilität als stratigraphisches Werkzeug – eine unterstützende Methode zur klassischen Profilaufnahme (Fallstudie: norddeutsche Oberkreide von Halle/Westfalen). *Geologica saxonica – Journal of central european geology*, 59, 149 -163.

Kehl, M. (2010). *Anleitung zur makroskopischen Beschreibung von Bohrkernen im Gelände Oktober 2010*. Unveröffentlicht, Universität zu Köln.

Mreyen, A.-S. (2013) *Endorheische Becken in SW-Spanien: eine GIS-Vorerkundung zu weiterführenden Paläoumwelt-Studien*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, RWTH Aachen.

Nowaczyk, N. R. (2001). Logging of magnetic susceptibility. In Last, W. M. & Smol, J. P. (Hrsg.), *Tracking environmental change using lake sediments, Vol. 1: Basin analysis, coring, and chronological techniques* (S. 155 – 170). Dordrecht, Niederlande: Kluwer Academic Publishers.

Palomeras, I., Carbonell, R., Flecha, I., Simancas, F., Ayarza, P., Matas, J., Martínez Poyatos, D., Azor, A., González Lodeiro, F., & Pérez Estaún, A. (2009). Nature of the lithosphere across the Variscan orogen of SW Iberia: Dense wide-angle seismic reflection data. *Journal of geophysical research*, 114, B02302, 1 – 29.

Pinheiro L. M., Wilson R. C. L., Pena dos Reis R., Whitmarsh R. B., Ribeiro A. (1996). The western Iberia margin: a geophysical and geological overview. In Whitmarsh, R. B., Sawyer, D. S., Klaus, A., and Masson, D. G. (Hrsg.), *Procedures of the ocean drilling program, scientific results, Vol. 149* (S. 3 – 23). Texas: College Station.

Pirrung, M. (2013). *Forschungsprojekt FluviMag: Fluviatiler Transport von Magnetomineralen – 3. Magnetische Suszeptibilität*. Abgerufen von http://www.angeo.uni-jena.de/cms/images/stories/projekte/FluviMag/fm-3_magnetische_suszeptibilit.pdf (25.05.2015).

Reed, J. M. (1998a). A diatom-conductivity transfer function for Spanish salt lakes. *Journal of Paleolimnology*, 19, 399 – 416.

Reed, J. M. (1998b). Diatom preservation in the recent sediment record of Spanish lakes: implications for palaeoclimate study. *Journal of Paleolimnology*, 19, 129 – 137.

Reed, J. M., Stevenson, A. C. and Juggins, S. (2001). A multi-proxy record of Holocene climate change in southwest Spain: the Laguna de Medina, Cádiz. *The Holocene*, 11, 705-717.

Salvany, J. S., Larrasoana, J. C., Mediavilla, C., & Rebollo, A. (2011). Chronology and tectono-sedimentary evolution of the Upper Pliocene to Quaternary deposits of the lower Guadalquivir foreland basin, SW Spain. *Sedimentary Geology*, 241, 22 – 39.

Sandgren, P., & Snowball, I. (2001). Application of mineral magnetic techniques to paleolimnology. In Last, W. M., & Smol, J. P. (Hrsg.), *Tracking environmental change using lake sediments, Vol. 2: Physical and chemical methods* (S. 217 – 238). Dordrecht, Niederlande: Kluwer Academic Publishers.

Stockhausen, H., & Zolitschka, B. (1999). Environmental changes since 13,000 cal. BP reflected in magnetic and sedimentological properties of sediments from Lake Holzmaar (Germany). *Quaternary science reviews*, 18, 913 – 925.

Thompson, R., & Oldfield, F. (1986). Mineral magnetic studies of lake sediments. In Thompson, R., & Oldfield, F. (Hrsg.), *Environmental magnetism* (S. 101 – 123). London: Allen and Unwin.

Thompson, R., Batterbee, R. W., O’Sullivan, P. E., & Oldfield, F. (1975). Magnetic susceptibility of lake sediments. *Limnology and Oceanography*, 20, 687 – 698.

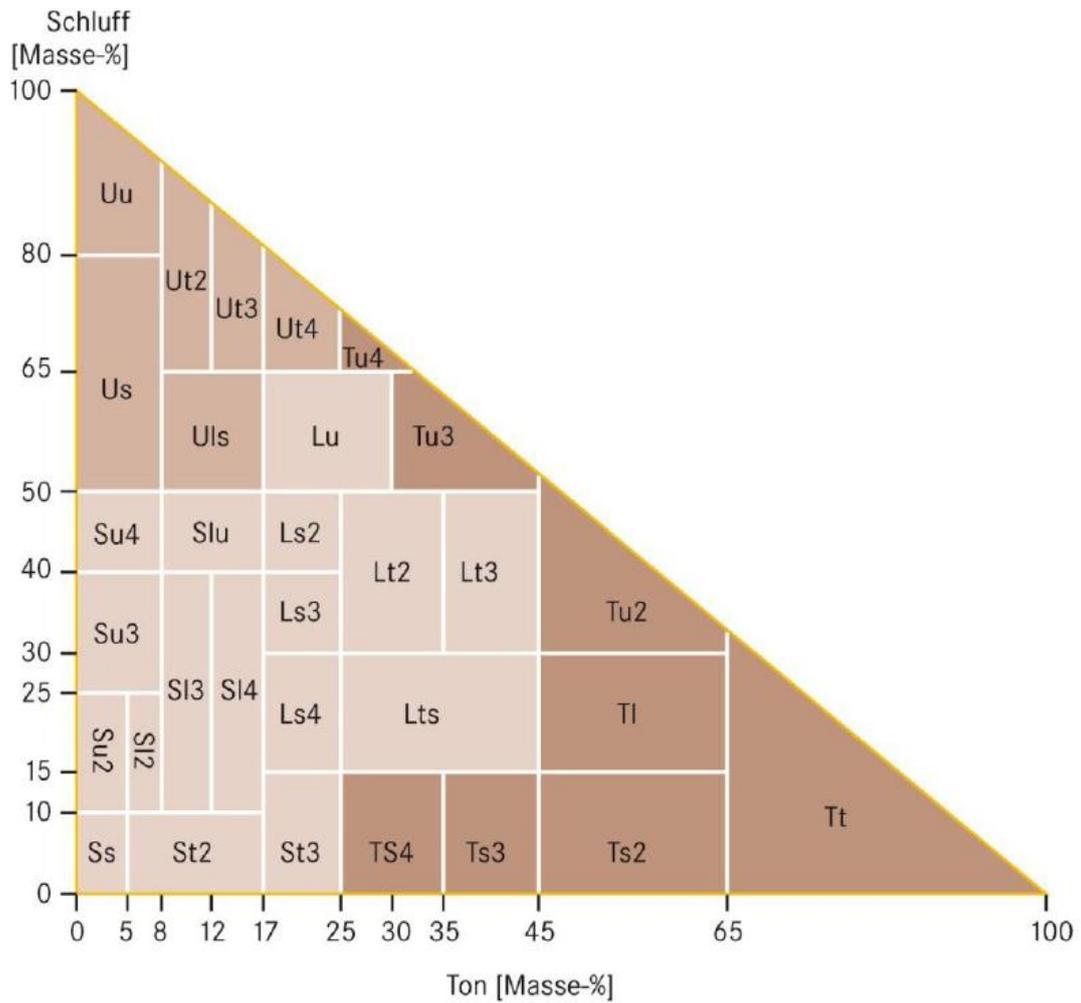
Vergés, J., & Fernandez, M. (2006). Ranges and basins in the Iberian Peninsula: their contribution to the present topography. In Gee, D., & Stephenson, R. (Hrsg.), *European Lithosphere Dynamics (Geological Society Memoir; S. 223 – 234)*. London: The Geological Society.

Vergés, J., Fernández, M., & Martínez, A. (2002). The Pyrenean orogen: pre-, syn-, and post-collisional evolution. *Journal of the Virtual Explorer*, 8, 55 – 74.

Anhang

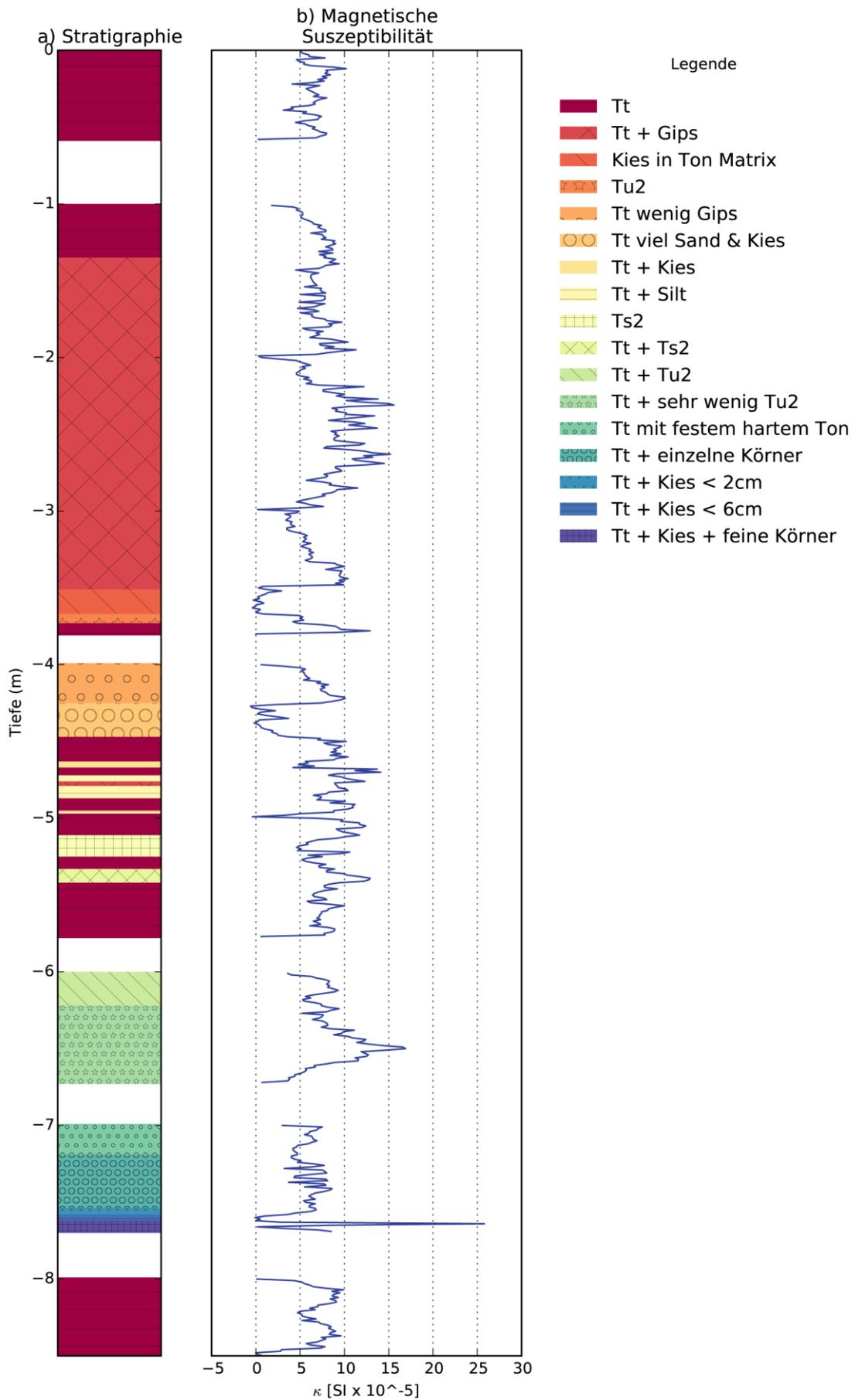
General Core Parameters	
Core ID: <input type="text" value="Co1313-2-1 0-102cm"/>	Comments: <input type="text" value="Core Co1313-2-1 0-102cm logged at 11:04:53 on 10-27-2014"/>
Nominal section length (cm): <input type="text" value="105.0"/>	
<input checked="" type="checkbox"/> Section Position Warning Pause	
<input type="checkbox"/> Log Initial Calibration Piece	
Section No. <input type="text" value="1"/> Est. time = 63 mins	
Sampling interval (cm): <input type="text" value="1.0"/>	
<input checked="" type="checkbox"/> Core Depth (cm) <input type="text" value="0.0"/>	Tie Points <input type="button" value="Enable All Sensors"/> <input type="button" value="Disable All Sensors"/>
Boat <input type="checkbox"/> Section Length: <input type="text" value="0.0"/>	
<input type="checkbox"/> Variable Sampling <input type="button" value="Setup"/>	<input type="checkbox"/> Automatic <input type="button" value="Add Pauses"/> <input type="button" value="Setup"/>
Core Thickness <input checked="" type="radio"/> On <input type="radio"/> Off	Gamma Attenuation <input checked="" type="radio"/> On <input type="radio"/> Off
P-Wave <input checked="" type="checkbox"/> Save wave form <input checked="" type="radio"/> On <input type="radio"/> Off	Count time (secs): <input type="text" value="10"/> Cycles: <input type="text" value="1"/>
Temperature <input checked="" type="radio"/> On <input type="radio"/> Off	Electrical Resistivity <input checked="" type="radio"/> On <input type="radio"/> Off
Magnetic Susceptibility (Sensor 1 point)	Averaging period (secs): <input type="text" value="1"/> <input checked="" type="checkbox"/> Zero before core (cm): <input type="text" value="10.0"/>
Sampling time (secs): <input type="text" value="10"/>	Zeroing Interval: <input type="text" value="1"/> <input checked="" type="radio"/> On <input type="radio"/> Off
Sample Cycles: <input type="text" value="1"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Zero before core(cm): <input type="text" value="10.0"/> Units: <input checked="" type="radio"/> SI <input type="radio"/> cgs
Area Camera <input type="radio"/> On <input checked="" type="radio"/> Off	Spectrophotometer <input checked="" type="radio"/> On <input type="radio"/> Off
<input type="button" value="Show Camera(s)"/>	Aperture: <input checked="" type="radio"/> MAV (8mm) <input type="radio"/> SAV (3mm) Reflectance Spectra Enabled
	<input type="checkbox"/> Munsell <input type="button" value="Show Setup"/>
<input type="button" value="Advanced"/>	<input type="button" value="Save and Quit"/>
<input type="button" value="Cancel"/>	<input type="button" value="OK"/>

Anhang 1: Einstellungen MSCL.

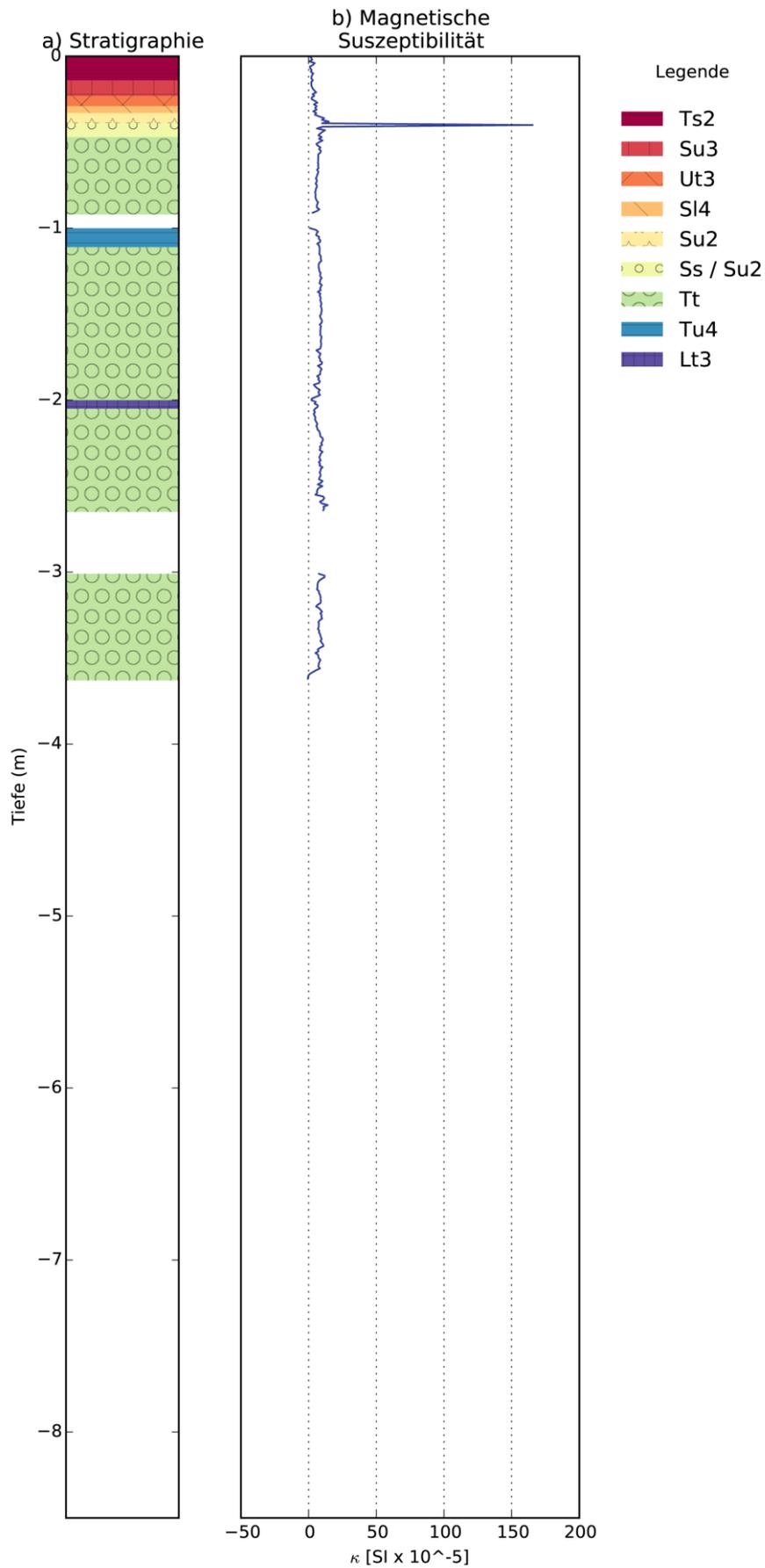


Aus Gebhardt/Glaser/Radtke/Reuber: *Geographie*. 1. Aufl., © 2007 Elsevier GmbH

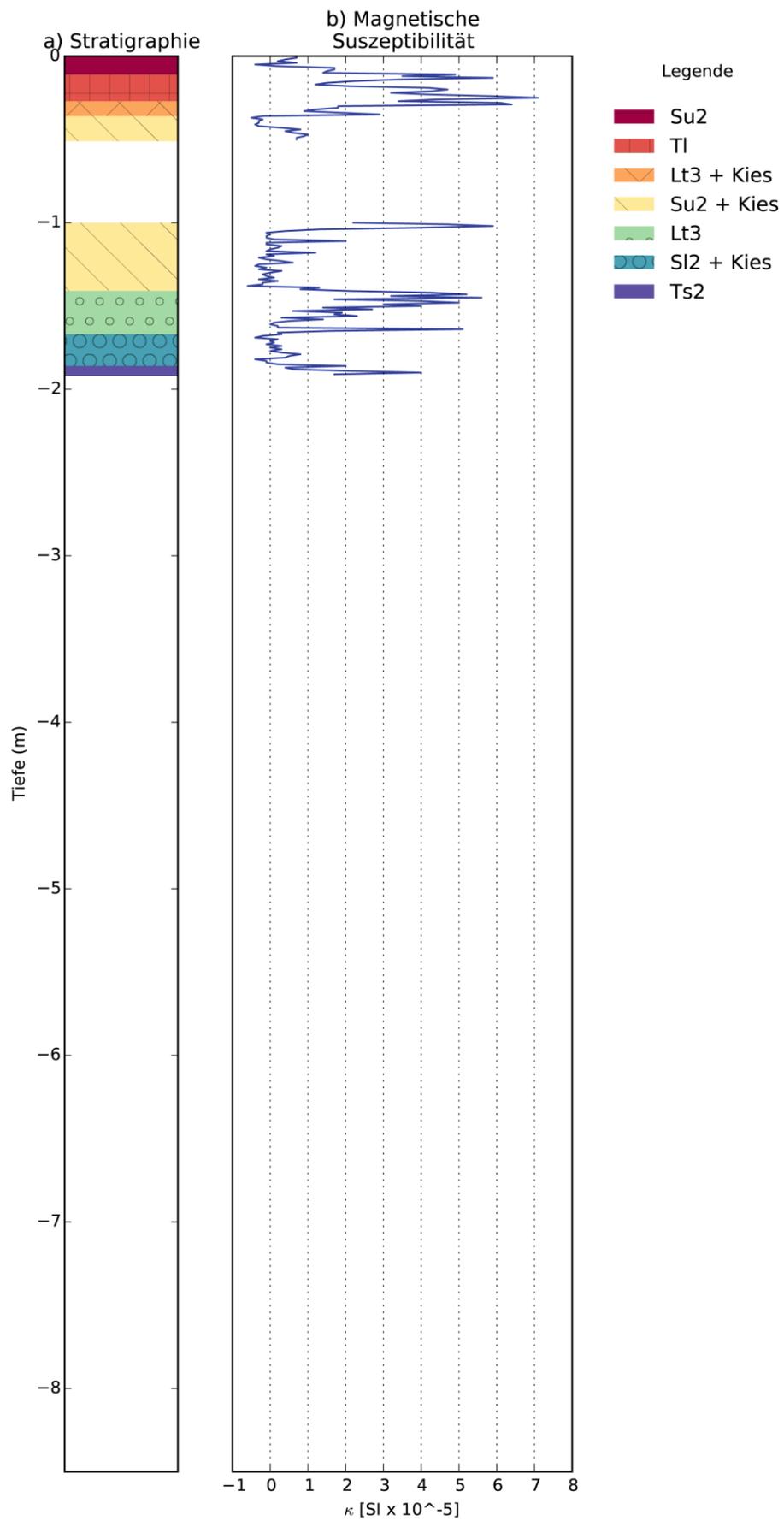
Anhang 2: Bodenartendreieck (Kehl, 2010, unveröffentlicht).



Anhang 3: Bohrung LML1, Stratigraphie und magnetische Suszeptibilität.



Anhang 4: Bohrung LML2, Stratigraphie und magnetische Suszeptibilität.



Anhang 5: Bohrung LML3, Stratigraphie und magnetische Suszeptibilität.



Anhang 6: Karte der Bohrungen und Oberflächenproben. Laguna de Medina (modifiziert nach Google Maps, 2015)