

Institut für Neotektonik und Georisiken
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Laguna Hondilla und Laguna de la Paja (Südspanien): Eine Paläoklimatische Betrachtung mittels multi-proxy Untersuchung

Laguna Hondilla and Laguna de la Paja (Southern Spain): A palaeoclimatic
study based on a multi-proxy approach

Bachelorarbeit im Fach Georessourcenmanagement
zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science (B.Sc.)
vorgelegt von

Luisa Stenmans
303034

Betreuerin:
Nicole Höbig

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

Aachen, September 2013

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass die vorstehende Arbeit von mir selbständig ohne unerlaubte fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder unveröffentlichten Schriften entnommen sind, sind als solche gekennzeichnet. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsarbeit eingereicht worden.

Aachen, 17.09.13

Luisa Stenmans

Kurzfassung

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 806 der Universität zu Köln, der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität Bonn und der RWTH-Aachen werden die klimatischen Bedingungen auf der Iberischen Halbinsel im Quartär rekonstruiert. Sedimente aus Salzseen eignen sich dazu besonders, da sie hochauflösend und unterbrechungsfrei die Paläoumweltbedingungen aufzeichnen. Diese Arbeit befasst sich daher mit der Untersuchung der lithologischen und geochemischen Verhältnisse in den Salzseen *La Paja* und *Hondilla* mit Hilfe von sedimentologischer Betrachtung, Messen der magnetischen Suszeptibilität und der Röntgenfluoreszenzanalyse. Aus den ausgewerteten Messergebnissen der *Laguna de la Paja* der magnetischen Suszeptibilität, sowie der Elemente Kalium, Titan, Vanadium, Rubidium, Blei und Calcium können zeitliche Muster abgeleitet werden, in denen an warme Phasen eine graduelle Abkühlung anschließt, auf die wiederum ein abrupter Temperaturanstieg folgt, ab dem sich das Muster wiederholt. Aus den Messergebnissen der *Laguna Hondilla* können keine klimatischen Rückschlüsse gezogen werden.

Abstract

The Collaborative Research Centre 806 established by the universities of Cologne, Bonn and Aachen reconstructs climatic conditions on the Iberian Peninsula in the quaternary. Lake sediments are especially useful for these reconstructions because of their high-resolution, interruption-free record of the palaeoenvironment. This thesis therefore examines the lithological and geochemical composition of lake sediments from *Laguna Hondilla* and *Laguna de la Paja*, including sedimentological analysis as well as measurements of magnetic susceptibility and X-ray fluorescence. The evaluated results from *Laguna de la Paja* from magnetic susceptibility and from potassium, titan, vanadium, rubidium and calcium show chronological patterns with warm phases adjoined by gradual cooling, which is in turn followed by an abrupt increase in temperature and the repetition of this pattern. The results of *Laguna Hondilla* do not allow conclusions about the palaeoclimatic conditions.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
1 Motivation und Fragestellung.....	1
2 Theoretischer Hintergrund.....	1
2.1 Sonderforschungsbereich 806 - Our way to Europe.....	1
2.2 Geologie.....	2
2.2.1 Entwicklung der Iberischen Platte.....	3
2.2.2 Betikum-Rif-Bogen.....	3
2.3 Klimazyklen im Quartär.....	6
2.3.1 Dansgaard-Oeschger-Zyklen.....	7
2.3.2 Heinrich-Events.....	8
2.3.3 Bond-Zyklen.....	8
2.4 Methoden der Paläoklimaforschung.....	9
2.4.1 Sonderstellung der Salzseen auf der Iberischen Halbinsel.....	10
3 Einführung in das Arbeitsgebiet.....	11
4 Methodik.....	14
4.1 Rammbohrkernverfahren.....	14
4.2 Sedimentologische Untersuchung.....	15
4.3 Magnetische Suszeptibilität.....	16
4.4 Röntgenfluoreszenzanalyse.....	18
5 Darstellung der Messergebnisse.....	20
5.1 Sedimentologische Untersuchung.....	20
5.2 Magnetische Suszeptibilität und Röntgenfluoreszenzanalyse.....	22
6 Auswertung und Interpretation.....	33
7 Diskussion und Ausblick.....	37

Abbildungsverzeichnis.....	39
Tabellenverzeichnis.....	41
Literaturverzeichnis.....	42
Anhang	i

1 Motivation und Fragestellung

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 806 der Universität zu Köln, der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität Bonn und der RWTH-Aachen wird die Ausbreitung des anatomisch modernen Menschen von Afrika nach Vorderasien und Europa, sowie das Aussterben des Neandertalers betrachtet. In diesem Zusammenhang halten viele Wissenschaftler ein Zusammenspiel verschiedener Faktoren für die Ursache des Aussterbens. Das Klima wird als einer der Hauptfaktoren erachtet. Um diesen zu untersuchen, wird versucht, das Paläoklima in Südspanien unter anderem anhand von Seesedimenten zu rekonstruieren.

Die Zielsetzung der vorliegenden Bachelor-Arbeit liegt deshalb in der Untersuchung der lithologischen und geochemischen Verhältnisse in den Salzseen *La Paja* und *Hondilla* mittels sedimentologischer Betrachtung, Messen der magnetischen Suszeptibilität und der Röntgenfluoreszenzanalyse zur Ermittlung von Hinweisen auf die klimatischen Verhältnisse im Quartär.

2 Theoretischer Hintergrund

2.1 Sonderforschungsbereich 806 - Our way to Europe

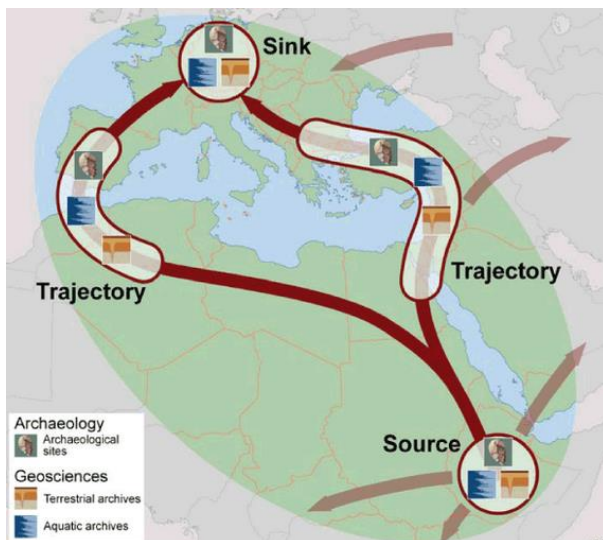


Abb. 1: Mögliche Wanderwegen des modernen Menschen (SFB-806 2013).

Der Sonderforschungsbereich 806 der Universität zu Köln, der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität Bonn sowie der RWTH Aachen befasst sich mit der Ausbreitung des anatomisch modernen Menschen von Afrika nach Vorderasien und Europa.

Dabei stehen zurzeit zwei Wanderwege zur Diskussion: Zum einen die östliche Route über das Niltal, den Vorderen Orient und den Balkan nach Europa, zum anderen der Weg durch Nordwestafrika über Gibraltar (Abb. 1).

Weg durch Nordwestafrika über Gibraltar (Abb. 1).

In Zusammenarbeit betrachten Archäologen, Geographen und Geologen die Zeitspanne der letzten 190.000 Jahre, die die Verbreitung des modernen Menschen aus Afrika bis zu seiner dauerhaften Niederlassung in Europa beinhaltet (Weniger & Reicherter n.d.).

Der Sonderforschungsbereich wird in mehrere Teilprojekte (Cluster) unterteilt. Eines davon ist das C-Cluster mit dem Bereich C1, der sich mit der möglichen Migration des Menschen über die Straße von Gibraltar nach Europa beschäftigt.

Neue Forschungen gehen davon aus, dass der moderne Mensch nicht von Süden über die Straße von Gibraltar nach Europa migriert ist, sondern dass sein Weg zur Iberischen Halbinsel über Zentraleuropa führte. Dies würde Iberien nach Finlayson et al. (2006) zu einem möglichen Refugium für den Neandertaler machen, der im restlichen Europa im Aurignacien durch den modernen Menschen verdrängt wurde. Es gibt jedoch auch andere Theorien, wie z. B. von Bradtmöller et al. (2012), die in ihrem *Repeated Replacement Model* davon ausgehen, dass klimatische Veränderungen, wie z.B. Heinrich-Events und Dansgaard-Oeschger-Zyklen, die Ursache für das Aussterben des Neandertalers sind. Sie vermuten außerdem, dass die Koexistenz von Neandertaler und modernem Menschen nur für einen sehr kurzen Zeitraum andauerte.

Durch Multi-Proxy-Ansätze und erneute Analysen aller schon vorhandenen geologischen und archäologischen Daten erforscht der C1-Bereich die Kultur- und Klimageschichte Iberiens im späten Pleistozän, um den Übergang von Châtelperronien zum Aurignacien rekonstruieren zu können.

Mit dem Beginn der zweiten Phase des Sonderforschungsbereichs wird es ein neues Projekt im C-Cluster (C3) geben, welches sich speziell mit Lagunen- und Seesedimenten auf der Iberischen Halbinsel als Klimaarchive für die Zeit vom späten Pleistozän bis zum mittleren Holozän beschäftigt (Weniger & Reicherter n.d.).

2.2 Geologie

Die Iberische Halbinsel bildet die westliche Verlängerung des alpinen Himalaya-Gürtels (Dercourt et al. 1986) und umfasst heute die Staaten Spanien und Portugal sowie die Fürstentümer Andorra und Gibraltar (Reicherter 2001).

2.2.1 Entwicklung der Iberischen Platte

Zu Beginn des Mesozoikums gehörte die Iberische Platte zu Eurasien (Dercourt et al. 1986), ihre kontinentalen Plattenränder entwickelten sich in der Zeit vom Trias bis zur Mittleren Kreide (Ziegler 1988; Ziegler 1990; Srivastava et al. 1990). Konsekutiv bildeten sich der atlantische Rand, die Abgrenzung zur Afrikanischen Platte und der nordöstliche Rand der Halbinsel entlang der Pyrenäen (Vergés & Fernández 2006).

Vor der Konvergenz der Eurasischen und Afrikanischen Platten kam es in der Kreide zur Subduktion der *mesogean oceanic crust*, die den Verlust des Tethys-Ozeans zur Folge hatte. Die anschließende Kollision der Kontinente im Paläozän und späten Eozän bewirkte das Abtauchen der Afrikanischen unter die Eurasische Platte (Rehault et al. 1984). Entlang der Plattengrenzen bildeten sich dadurch Orogene Gürtel, Intraplatten-Deformationen und paläogene Sedimentbecken (Friend & Dabrio 1996).

Vom Mittleren Eozän bis Ende des Oligozäns waren die Iberischen Plattengrenzen aktiv, jedoch unabhängig von der Afrikanischen Platte. In den letzten 24 Millionen Jahren fanden dabei an der Afrikanisch-Iberischen Plattengrenze Deformationen statt, die zur Bildung des Gibraltar-Bogens mit der Betischen Kordillere und dem Rif führten (Vergés & Fernández 2006).

2.2.2 Betikum-Rif-Bogen

Der bogenförmige Betikum-Rif-Bogen setzt sich aus der Betischen Kordillere und dem Rif-Gebirge Nordmarokkos zusammen. Es umgibt die Alboran See und wird von der Straße von Gibraltar durchzogen.

Die Ausbildung des Rif-Betikum-Orogens ist bis heute nicht eindeutig geklärt und wird durch drei verschiedene Theorien beschrieben (Reicherter 2001). Diese reichen von dem Radialen Extensionskollaps (Platt & Vissers 1989) über die Indention der Alborán-Mikroplatte (Andrieux et al. 1971) bis hin zum westgerichteten *subduction rollback* (Lonergan & White 1997).

Bei der **Betischen Kordillere**, deren Struktur auf Abb. 2 zu sehen ist, handelt es sich um ein ENE-WSW streichendes Gebirge (Vergés & Fernàndez 2006) mit einer Ausdehnung von 600 km Länge und 200 km Breite. Sie bildet den westlichsten Teil der alpinen Gebirgskette und entstand während der Genese der Alpen durch den Rückzug des Tethys-Ozeans (García-Hernández et al. 1980).

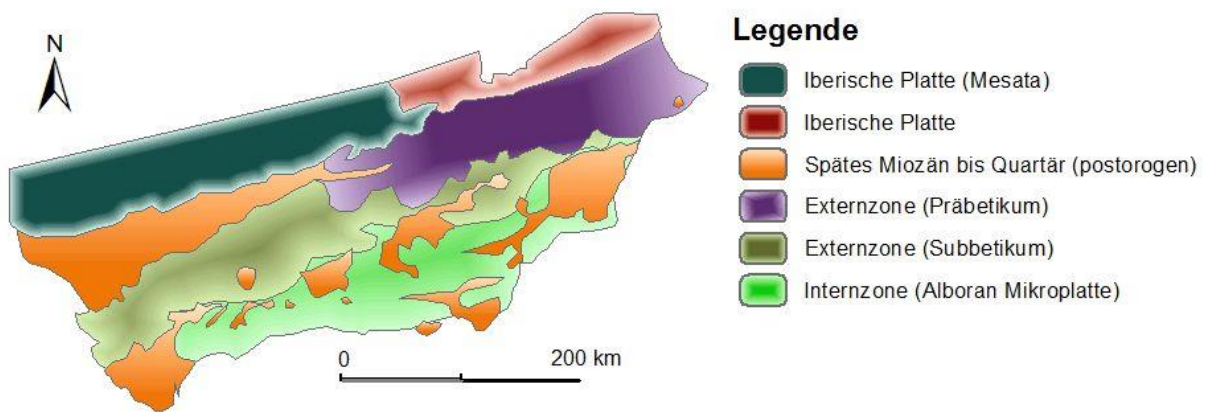


Abb. 2: Tektonische Struktur der Betischen Kordillere (Rodríguez-Rodríguez 2007).

Durch gegebene lithologische, paläogeographische und tektonische Eigenschaften lässt sich die Gebirgskette in die Intern- und Externzone mit dem Guadalquivir-Vorlandbecken unterteilen (Sanz De Galdeano 1990).

Die **Internzone** ist das Ergebnis der Kollision eines Bruchstückes des ehemaligen Alboran-Mikrokontinentes mit Iberien während des Meso- und frühen Känozoikum (Reicherter 2001). Ihre Struktur ergibt sich hauptsächlich aus überschobenen Schichten der Trias und des Paläozoikums (García-Hernández et al. 1980). Die drei Haupteinheiten sind der Nevado-Filábride-Komplex in der Basis, der Alpujárride-Komplex in der Mitte, und der überlagernde Malaguide-Komplex. Der alpine Metamorphosegrad unterscheidet sich in jeder Schicht und nimmt von unten nach oben ab (Vergés & Fernàndez 2006).

Die **Externzone** schließt wie in Abb. 2 ersichtlich nordwestlich an die Internzone an. Im Gegensatz zu Letzterer sind in der Externzone keine paläozoischen Gesteinseinheiten aufgeschlossen. Sie bilden dagegen die Basis, auf der triassische bis miozäne Schichten nach

Norden bewegt wurden (García-Hernández et al. 1980).

Die am Kontinentrand des iberischen Hochlands, der sogenannten Iberischen Meseta, sedimentierten Einheiten der Externzone werden in Präbetikum und Subbetikum unterteilt (Blumenthal 1927; Fallot 1948). Dazwischen befinden sich die *intermediate units*, sie liegen auf dem Prä- und unter dem Subbetikum und sind faziell eine Mischung aus beiden Einheiten (García-Hernández et al. 1980).

Die Schichten bilden ein weitreichendes Überschiebungssystem und fallen hauptsächlich Richtung Vorland ein (Banks & Warburton 1991).

Die **neogene Beckenbildung** fand im unteren bis mittleren Miozän unterteilt in eine syn- und eine post-orogene Phase statt (Viseras et al. 2005). Man unterscheidet diese Becken nach Sanz de Galdeano und Vera (1992) in Intramontan- und Vorland-Becken, von denen eines das Guadalquivir-Becken ist. Verschiedene Entstehungstheorien sprechen einerseits von *strike-slip*-Störungen (Rodríguez-Fernández et al. 1989; Lonergan & White 1997) und andererseits von großen Abschiebungen (Sanz de Galdeano & Vera 1992) als bildende Faktoren.

Intramontane Becken befinden sich hauptsächlich an dem Kontakt zwischen Intern- und Externzone des Betikums. Generell handelt es sich dabei um relativ kleine Becken, die mit neogenen Ablagerungen gefüllt sind (Iribarren et al. 2003). Oft sind sie südlich gestört und grenzen im Norden diskordant an metamorphe Schichten oder externe Einheiten (Visser et al. 1995).

Das ENE-SWS-streichende **Guadalquivir-Becken** ist das Vorlandbecken des zentralen und westlichen Teils der Betischen Kordillere (Reicherter 2001; Berástegui et al. 1998) und wird durch den Flussverlauf des Guadalquivirs im Norden begrenzt (Iribarren et al. 2003). Im Gegensatz zum High-Tagus-Becken (Madrid), sowie den Duero- und Ebro-Becken (Nordspanien), liegt es außerhalb der Iberischen Meseta und stellt ihre südliche Grenze dar (Casas-Sainz & De Vicente 2009; Vergés & Fernández 2006). Zudem unterscheidet es sich durch seine Drainage-Eigenschaften von den anderen und zählt zu den exorheischen Becken (Casas-Sainz & De Vicente 2009).

In seinem frühen Evolutionsstadium war das Guadalquivir-Becken zum Atlantik hin offen und hat daher eine marin-kontinentale Entwicklung durchlaufen (Casas-Sainz & De Vicente

2009). Die Füllung des Beckens besteht aus postorogenen Sedimenten, die Mächtigkeiten von 600–1500 m aufweisen (Reicherter 2001).

Die **Einheiten des Campo de Gibraltar** bestehen aus terrigenen Ablagerungen des Oligozäns bis zum frühen Miozän (Crespo-Blanc & Campos 2001). Dieser über dem Subbetikum liegende Bereich weist keine älteren Substratunterlager auf und ist stark verfaltet (Reicherter 2001). Sanz de Galdeano (1990), der die Entstehung des Gibraltar-Bogens tektonisch interpretiert, geht von einer extensionalen Bewegung des Alboran-Beckens aus, die eine Materialkomprimierung des Flysch-Beckens verursachte. Des Weiteren wurde der Flyschkomplex laut Durand-Delga und Fontboté (1980) von der Betischen Dorsale überschoben. Diese Verformungen reichten bis zum späten Torton (Gràcia et al. 2003).

Im späten Paläogen und Neogen formten Extensionsprozesse den Valenzia-Trog und darauffolgend die **Alboran See** (Sanz de Galdeano 1996). Letztere ist 150 km breit und 350 km lang. Begrenzt wird sie im Norden durch die Betische Kordillere und im Süden durch das Rif von Marokko (Comas et al. 1992). Die Abtrennung vom Atlantik bildet die Straße von Gibraltar (Reicherter 2001). Die Alboran See erreicht eine Tiefe von weniger als 2000 m und ist durch eine komplexe Untergrund-Physiografie gekennzeichnet (Comas et al. 1992). Sie ist von ausgedünnter kontinentaler Kruste unterlagert, die Mächtigkeiten von 13 bis 20 km erreicht (Sanz De Galdeano 1990; Platt & Vissers 1989). Die Eintiefung der Alboran See, wie auch die der neogenen Becken, fand im frühen bis mittleren Miozän durch Extension und Subsidenz statt (Hoernle et al. 1999).

2.3 Klimazyklen im Quartär

Das Quartär ist das jüngste Erdzeitalter und erstreckt sich über die letzten 2,588 Mio. Jahre. Es wird in Pleistozän (2,588 Mio. Jahre –11.700 Jahre vor heute) und Holozän (11.700 Jahre vor heute - heute) unterteilt (Cohen et al. 2013).

Das Pleistozän wird durch seine Abgrenzung als letztes Eiszeitalter definiert, das Holozän dagegen wird als Interglazialzeit angesehen (Woldstedt 1962), das mit dem Beginn des letzten Kälterückschlags der Weichsel-/Würm-Vereisung zusammenfällt.

Kennzeichnend für das Quartär sind starke, abrupte Klimaschwankungen aufgrund von internen und externen Prozessen, die gekoppelt mit Wechselwirkungen innerhalb des Klimasystems auftreten (Abrantes et al. 2012; Kubatzki 2000). Es wird dabei zwischen

tektonischen Prozessen, astronomischen Einwirkungen und rezenteren Ereignissen, z.B. atmosphärischen und ozeanischen Instabilitäten (*millennial scale variability*), sowie anthropogen induzierten Klimaschwankungen unterschieden (Abrantes et al. 2012; Wolff et al. 2010). Verschiedene klimatische Muster und Besonderheiten des Quartärs wurden von Wissenschaftlern entdeckt und beschrieben, dazu gehören die Dansgaard-Oeschger-Zyklen und die Heinrich-Events, sowie die Bond-Zyklen (Dansgaard et al. 1993; Heinrich 1988; Bond et al. 1997).

2.3.1 Dansgaard-Oeschger-Zyklen

Die Dansgaard-Oeschger-Zyklen (D/O-Zyklen) stellen eine dynamische Phase während des letzten Glazials dar und sind durch schnelle Klimawechsel charakterisiert (Wolff et al. 2010; Dansgaard et al. 1993). Anhand von Aufzeichnungen grönländischer Eisbohrkerne der letzten Glazialperiode entdeckte man diese Wechsel bei der Untersuchung von Sauerstoff-Isotopenverteilungen. Dabei deuteten Schwankungen der $\delta^{18}\text{O}$ -Isotope auf markante Wechsel von Warm- und Kaltzeiten in den letzten 75000 Jahren hin (Rasmussen et al. 1996). Kennzeichnend sind abrupte Aufwärmphasen mit einem Temperaturanstieg von meist $>10^\circ\text{C}$ und einem nachfolgenden graduellen Abkühlen („Sägezahnmuster“, Abb. 3) (Wolff et al. 2010; Genty et al. 2003).

Diese Abkühlungsperioden, die mit den Heinrich-Events korrelieren, nennt man Stadiale (Moreno et al. 2005). Sie führten zur Veränderung der thermohalinen Zirkulation im Nordatlantik aufgrund von kalten polaren Wassermassen, die durch das Abschmelzen von Eiskappen ins Mittelmeer eingedrungen waren (Bond et al. 1993; Moreno et al. 2005). Die Aufwärmphasen werden als Interstadiale bezeichnet. Sie zeichnen sich durch wärmere Temperaturen und eine höhere kontinentale Humidität aus (Moreno et al. 2005).

Die Dauer eines D/O-Zyklus liegt in etwa zwischen 500 und 3000 Jahren (Dansgaard et al. 1993), seine durchschnittliche Periodizität beträgt nach Wolff et al. (2010) 1450 Jahre. Es konnten in der Vergangenheit 24 solcher Zyklen in grönländischen Eiskernen datiert werden (Genty et al. 2003).

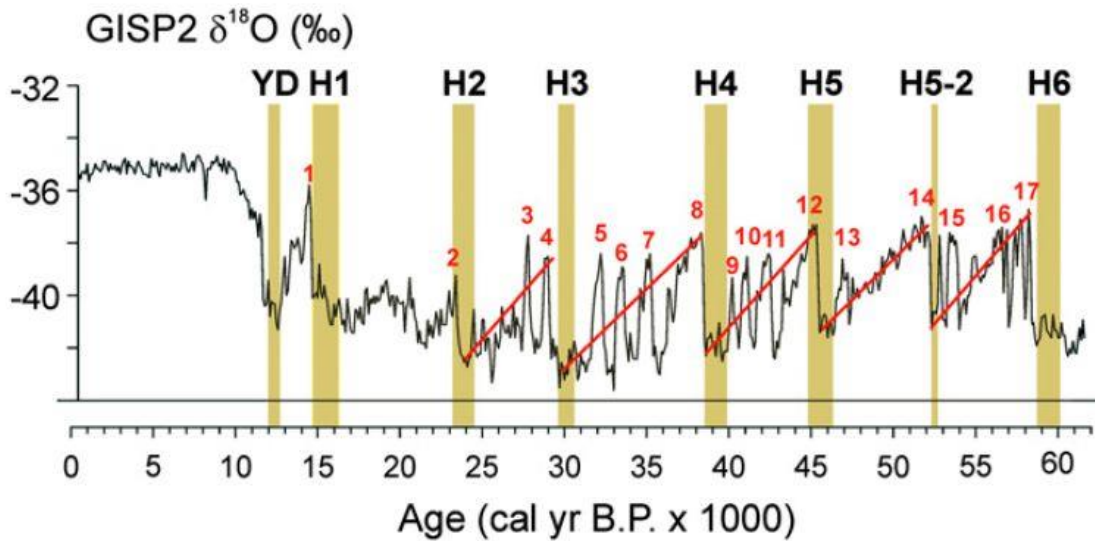


Abb. 3: Korrelation zwischen D/O-Zyklen, Heinrich-Events und Bond-Zyklen mit der $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopenverteilung nach Eric Grimm mit Daten von (Bond et al. 1993; Stoner et al. 2000; Sarnthein et al. 2001) aus (Graham 2005).

2.3.2 Heinrich-Events

Der deutsche Paläoklimatologe Hartmut Heinrich definierte die nach ihm benannten Heinrich-Events. In marinen Sedimentkernen des Nordatlantiks bemerkte er auffällige Grobfractionen ($> 180 \mu\text{m}$) von Sedimentablagerungen, die aus der letzten Glazialperiode stammen (Heinrich 1988). Diese Grobfractionen bezeichnete er als *ice-rafted detritus*, also vom Eisberg transportiertes Material, das auf große Kalbungsvorgänge an Eisschilden während der Interstadiale zurückzuführen ist (Bradley 1999). Grousset et al. (1993) erläutern gestützt von Cacho et al. (1999), dass diese Sedimente weit über den Atlantik transportiert wurden, wo sie zum ersten Mal im Mittelmeerraum an Bohrungen in der Alboran See identifiziert wurden. Die Heinrich-Events äußern sich daher in diesen grob-sedimentologischen Schichten, auch Heinrich-Layer genannt, und deuten auf Kältemaxima hin (Heinrich 1988).

Bisher konnten sechs solcher Events in Bohrkernanalysen nachgewiesen werden (Bond et al. 1992; Bond et al. 1993), ihr Wiederkehrintervall schwankt zwischen 7000 und 17000 Jahren (Abb. 3).

2.3.3 Bond-Zyklen

Gerard C. Bond, ein US-amerikanischer Geologe, stellte in seiner Arbeit die D/O-Zyklen und die Heinrich-Events in einen direkten Zusammenhang und fasste diese in übergeordneten

zehntausend-jährigen Klimazyklen zusammen (Bond et al. 1997). In der Regel beinhaltet ein Bond-Zyklus vier bis fünf D/O-Zyklen (Abb. 3). Beendet wird er mit einem Kältemaximum, das mit einem Heinrich-Event zusammenfällt (Voelker 1999), auf das eine erneute Erwärmungsphase folgt (Bond & Lotti 1995).

2.4 Methoden der Paläoklimaforschung

Zur Rekonstruktion des Paläoklimas einer Region kann man auf natürliche Klimaarchive zurückgreifen. Diese sind entweder an der Oberfläche aufgeschlossen oder können durch Bohrkerne gewonnen werden. Sie sind Speicher vergangener Umweltparameter, die mit verschiedenen Methoden offengelegt werden können. In Tab. 1 sind die wichtigsten Klimaarchive mit ihrer Reichweite und ihrem Informationspotential dargestellt.

Tab. 1: Natürliche Klimaarchive verändert aus (Bradley 1999) nach (Bradley & Eddy 1991).

Klimaarchive	Reichweite (in a)	Informationspotential
Historische Aufzeichnungen	10^3	T, N, B, V, M, W, S
Jahresringe (Bäume)	10^4	T, N, B, V, M, S
Seesedimente (Warven)	10^4 - 10^6	T, B, M, N, V, C _w
Korallen	10^4	C _w , W, T, N
Eisbohrkerne	5×10^5	T, N, C _L , W, V, N, S
Pollen	10^5	T, N, B
Speläotheme	5×10^5	C _w , T, N
Paläoböden	10^6	T, N, B
Löss	10^6	N, B, M
Geomorphologische Ausbildung	10^6	T, N, V, W
Marine Sedimente	10^7	T, C _w , B, M, W, N

Erläuterung: T=Temperatur; N=Niederschlag, Luftfeuchte, Wasserhaushalt; C=Chemische Zusammensetzung von Wasser (C_w) und Luft (C_L); B=Biomasse- und Vegetationsverteilung; V=Vulkanische Eruptionen; M=Schwankungen des Geomagnetfelds; W=Wasserspiegel; S=Solaraktivität

Im Rahmen dieser Arbeit wurden terrestrische Archive, genauer Seesedimente, mit einem multi-proxy Ansatz untersucht, um paläoklimatische Rekonstruktionen zu ermöglichen. Proxys sind dabei Daten, die nicht direkt Informationen über das Klima beinhalten, die aber indirekt Rückschlüsse zulassen, da sie von klimatischen Faktoren beeinflusst werden, z.B. Änderungen der fossilen Organismen oder in sedimentären Ablagerungen (Birks & Birks 2006). Der multi-proxy Ansatz kombiniert möglichst viele dieser Proxy-Daten, um ihre Aussagekraft zu stärken und mögliche Schwächen auszugleichen (Mann 2002).

Zur Erforschung des Paläoklimas in lakustrinen Archiven werden meist Kernbohrungen abgeteuft und die daraus gewonnenen Sedimente untersucht. Es gibt verschiedene Untersuchungsmethoden, darunter u.a. die Sedimentologie, Palynologie und geochemische Elementanalyse.

Sedimentologische Untersuchungen erfordern meist eine Aufbereitung des Materials, um einzelne Parameter zu determinieren. Darunter fällt beispielsweise die Korngrößenanalyse, Porosität und Schichtungsverhältnisse. Resultierend können Unterschiede in den Lagen mit Änderungen der vergangenen Umweltbedingungen in Verbindung gebracht werden. Die Untersuchung von Pollen ermöglicht Rückschlüsse auf die Vegetation zum Ablagerungszeitraum und damit auf die klimatischen Bedingungen, die zu der Zeit vorherrschten (z.B. Jalut et al. 2000). Geochemische Elementanalysen, z.B. mit Röntgenfluoreszenzanalyse wie Martín-Puertas et al. (2009) sie durchgeführt haben, geben hochaufgelöste Elementzusammensetzungen der einzelnen Schichten wieder. Mit zusätzlichen geographischen und geologischen Informationen kann daraus ebenfalls auf das Paläoklima geschlossen werden.

2.4.1 Sonderstellung der Salzseen auf der Iberischen Halbinsel

Für die Erforschung des quartären Klimas nimmt die Iberische Halbinsel mit ihren lakustrinen Ablagerungen eine Sonderstellung ein.

Die Iberische Halbinsel verdankt diese Sonderstellung ihrer geographischen Lage. Die subpolaren und subtropischen Klimazonen treffen hier aufeinander und machen sie zum Bindeglied zwischen der Westwindzone und den nordafrikanischen Einflüssen (Bout-Roumazeilles et al. 2007; Moreno et al. 2005). Sie bildet einen für klimabedingte Umweltveränderungen sensiblen Bereich. Dies spiegelt sich besonders in sedimentären

Ablagerungen wider, z.B. in endorheischen Salzseen, die in Iberia häufig vorkommen (Reed 1996).

Die Salzseen eignen sich nach Reed (1996) besonders gut als Lieferanten für hochauflösende, unterbrechungsfreie Paläo-Umweltstudien. Sie zeichnen Änderungen im Klima, der Tektonik, der geomorphologischen Aktivitäten, der Vegetation und Biotik im Wasser, sowie von anthropogenen Einflüssen in ihren Sedimenten auf (Cohen 2003).

Durch die Analyse von Bohrkernen können Rückschlüsse auf die Paläolimnologie von Seen gezogen werden. Dies beinhaltet ehemalige Wasserspiegelstände und damit verbunden die Salinität und klimatisch bedingte Änderungen des Wasserhaushalts (Morellón et al. 2009). Die Qualität dieser geochemischen Signaturen ist besonders hoch, da die Seen auch auf kurzfristige Änderungen der Umweltbedingungen reagieren und durch ihre hohen Sedimentationsraten eine chronologische Aufzeichnung mit wenigen Unterbrechungen ermöglichen (Battarbee 2000).

3 Einführung in das Arbeitsgebiet

Die Salzseen *Laguna de la Paja* und *Laguna Hondilla*, an denen Bohrungen abgeteuft wurden, liegen beide in Südspanien (Abb. 4): Die *Laguna de la Paja* befindet sich südöstlich von Chiclana de la Frontera bei San Fernando (36° 23' 26,7" N, 6° 7' 50,7" W), die *Laguna Hondilla* nordwestlich von Arcos de la Frontera bei Espera (36° 52' 22,9" N, 5° 51' 42,5" W).



Abb. 4: Lage der *Laguna de la Paja* (A) und der *Laguna Hondilla* (B) in Spanien (1) und Südspanien (2) (Geoplaner n.d.).

Die *Laguna de la Paja* gehört zu der Gemeinde Chiclana de la Frontera, die sie gemeinsam mit dem Verwaltungsrat der Junta de Andalucía im Jahr 1994 zum Naturschutzgebiet erklärte. Sie ist 40 ha groß, halbkreisförmig und weist eine Wassertiefe von bis zu einem Meter auf. An seinem südlichen Ende besitzt der Salzsee einen Überlauf, von wo aus das Wasser zum Bach Ahogarratones geleitet wird (CHG 2005).

Im Jahr 2005 ließ das spanische Umweltministerium eine hydrogeologische Beschreibung und Untersuchung der Feuchtgebiete Andalusiens durchführen.

Der mittlere Jahresniederschlag an der Messstation „Campano“, 4 km südlich von Chiclana de la Frontera, beträgt 681 mm und erreicht sein Maximum mit 127 mm im Dezember, sowie sein Minimum mit 0 mm im Juli. Die Jahresdurchschnittstemperatur liegt bei 16,9 °C. Ungefähr 33 % des Niederschlags fließt als Oberflächenabfluss ab, während 67 % des restlichen Wassers durch Evapotranspiration zurück in die Atmosphäre gelangen. Die Salinität des Wassers weist hohe Schwankungen auf. Im Mittel der Messungen seit 2003 beträgt sie 2,35 mS/cm mit dem Minimum als Süßwasser im Mai 2004 (0,24 mS/cm) und dem Maximum als Brackwasser im Januar 2005 (5,66 mS/cm) (CHG 2005).

Umgeben wird die *Laguna de la Paja* von subbetischen Gesteinen aus der Trias (Ton und Gips mit eingeschaltetem Ton- und Sandstein) und dem Oligozän. Über den triassischen Gesteinen, befinden sich Schichten aus Mergel und Kalkstein, die dem Paläogen zugeordnet werden und die wiederum von pliozänem und quartärem Material überlagert werden (CHG 2005).

Hydrologisch lassen sich die das Becken umgebenden Schichten in zwei Einheiten unterteilen: Das tonig-lehmige, gering durchlässige Substrat aus Trias und Tertiär, sowie die pliozän-quartären Schichten mit hoher Durchlässigkeit, die aus Sand, Kalkareniten und alluvialen Ablagerungen bestehen.

Die Bohrungen La Paja1 und La Paja2 wurden am südlichen Rand neben der *Laguna de la Paja* auf einer Betonplattform, die ehemals bebaut war, abgeteuft. Die Lage der Bohrpunkte ist auf Abb. 5 zu erkennen.



Abb. 5: Lage der Bohrpunkte La Paja1 (A) und La Paja2 (B) (Geoplaner n.d.).

Die *Laguna Hondilla* befindet sich etwa 60 km nordöstlich der *Laguna de la Paja*. Sie bildet zusammen mit der *Laguna Salada de Zorrilla* und der *Laguna Dulce de Zorrilla* die *Lagunas de Espera*. Im Jahre 1989 wurden sie gemeinsam zum Naturschutzgebiet erklärt.

Die Gesamtfläche der *Laguna Hondilla* beträgt 36 ha, von denen 2,6 ha wassergefüllt sind. Sie ist ellipsenförmig und weist eine Maximaltiefe von 3 m auf, ist nicht permanent mit Wasser gefüllt, sondern fällt während längerer Dürreperioden trocken (CHG 2005). Die Bohrung wurde am nördlichen Rand des Salzsees in unmittelbarer Ufernähe abgeteuft (Abb. 6).

Auch zur *Laguna Hondilla* wurde vom spanischen Umweltministerium eine Beschreibung der hydrogeologischen Situation herausgegeben. Die jährliche Durchschnittstemperatur an der Messstation *El Algarrotillo*, in etwa 2 km Entfernung zum Salzsee, beträgt 18,3°C. Der durchschnittliche Jahresniederschlag liegt bei 525 mm mit dem Maximum im Dezember mit 99 mm und dem Minimum im Juli mit 1 mm Niederschlag. Die jährliche potentielle Evapotranspiration liegt bei 935,9 mm, die reelle bei 449,2 mm. Die mittlere elektrische Leitfähigkeit aus Messungen von 1997-2000 und 2003-2004 beträgt 3,23 mS/cm mit einer Spannbreite von 1-11 mS/cm. Als Hauptionen wurden im Salzsee Sulfat, Chlorid und Calcium

bestimmt (CHG 2005).

In der Umgebung der *Laguna Hondilla* sind hauptsächlich Kalksteine, Dolomite, Mergel, Sandsteine und Gips aus der Trias anstehend, die zum Guadalquivir-Becken gehören.



Abb. 6: Lage des Bohrpunktes Hondilla (A) (Geoplaner n.d.).

4 Methodik

Zur Gewinnung der untersuchten lakustrinen Sedimente wurden zunächst Rammbohrungen durchgeführt. Die gewonnenen Bohrkerne wurden anschließend im Labor sedimentologisch, sowie mit Röntgenfluoreszenzanalyse und einem Gerät zur Messung der magnetischen Suszeptibilität untersucht.

4.1 Rammbohrkernverfahren

Ziel einer Bohrung ist es senkrecht Material aus dem Boden zu entnehmen, um die Schichten im Untergrund betrachten und gegebenenfalls untersuchen zu können. Für die benötigten Proben der Salzseen wurden an geeigneten Standorten in Ufernähe Bohrungen abgeteuft. An der *Laguna de la Paja* wurden zwei Bohrungen durchgeführt (La Paja1: 8m Tiefe, La Paja2: 4m Tiefe), an der *Laguna Hondilla* eine (Hondilla: 5m Tiefe).

Beim Rammbohrkernverfahren wird mit Hilfe eines Hydraulikhammers eine Sonde in den Boden gerammt (Abb. 7). Dies geschieht für jeden Meter in einem einzelnen Bohrschritt, da die Sonde nur einen Meter lang ist. Durch einen Meter lange Stangen, die sich auf die Sonde

schrauben lassen, kann diese in die richtige Tiefe getrieben werden. Mittels einer Hydraulik lässt sich die Sonde samt Inhalt aus dem Bohrloch ziehen.

An der *Laguna de la Paja* wurde dabei eine Liner-Sonde verwendet, in die ein Plastikrohr, der sogenannte Liner, gegeben wird, in dem das erbohrte Material verschlossen transportiert werden kann. Für die Proben der *Laguna Hondilla* wurden Schlitz-Sonden verwendet, in deren Öffnung man das erbohrte Material direkt betrachten und daraus Proben entnehmen kann (Abb. 7). Für diese Proben wurde die Bohrkernbeschreibung direkt im Feld durchgeführt.

Alle drei Bohrungen wurden so nah wie möglich am Rand der jetzigen Salzseen abgeteuft, mit der Intention die Bohrung in Bereiche zu bringen, die bei höherem Wasserstand Teil dieses Sees waren und somit Rückschlüsse auf das Paläoklima ermöglichen (vgl. Kapitel 2.4.1).



Abb. 7: Rammbohrung (links) und Entnahme von Proben aus einer Schlitz-Sonde (rechts).

4.2 Sedimentologische Untersuchung

Für die sedimentologische Untersuchung wurden die Liner im Labor mit einer Liner-Säge aufgeschnitten. Anschließend wurde die Probe anhand von optischen Kriterien in Abschnitte unterteilt, die einzeln hinsichtlich der in Tab. 2 dargestellten Kriterien untersucht wurden. Für die Beschreibung der Farben wurde die Munsell Rock-Color Chart verwendet, die Proben waren dabei trocken.

Tab. 2: Kriterien zur Bohrkernbeschreibung.

Kriterien	Ausprägungen	Bedeutung	Ausprägungen	Bedeutung
Grenze an Abschnittswechsel	scharf (s) deutlich (de) allmählich (a) diffus (di)	0-1 cm 1-3 cm 3-6 cm > 6 cm		
Farbname und -nummer	nach Munsell Rock-Color Chart			
Gehalt und Größe der Fleckung/Bänderung	keine (k) sehr wenige (sw) wenige (w) viele (v) sehr viele (sv)	0% < 2 % 2-10 % 10-30 % >30%	sehr fein (sf) fein (f) mittelgroß (mg) groß (g)	< 2 mm 2-6 mm 6-20 mm > 20 mm
Bodenart nach Korngröße	Ton Lehm Schluff Sand Kies	< 0,002 mm Gemisch von Sand, Schluff und Ton 0,002-0,063 mm 0,063-2 mm 2-63 mm		
Karbonatgehalt	C0 C1 C2 C3 C4 C5	Carbonat-frei sehr Carbonat-arm Carbonat-arm mäßig Carbonat-haltig Carbonat-reich sehr Carbonat-reich		
Beschreibung von Konzentrationen	z.B. Eisen-, Organik- und Carbonatkonzentrationen			

Zusätzlich wurden zur Untersuchung von Mikrofossilien aus acht sandigen und einem schluffigen Abschnitt der Bohrkern der La Paja1-Bohrung Material entnommen (siehe Tab. 3) und mit einem Sieb mit einer Körnung von 0,063 mm geschlämmt, um die Tonfraktion von eventuell vorhandenen Mikrofossilien zu trennen. Anschließend wurden diese bei 40°C getrocknet und mikroskopisch auf das Vorhandensein von Mikrofossilien untersucht.

Tab. 3: Entnahmebereiche zur Untersuchung der Mikrofossilien aus den La Paja1-Bohrkernen.

Bohrkern	Entnahmebereich	Bodenart
La Paja1, 0-1 m	keine Entnahme	
La Paja1, 1-2 m	1,50- 1,52 m	sandig
La Paja1, 2-3 m	keine Entnahme	
La Paja1, 3-4 m	3,32- 3,34 m	sandig
La Paja1, 4-5 m	4,40- 4,42 m 4,70- 4,72 m	sandig schluffig
La Paja1, 5-6 m	5,28-5,30 m	sandig
La Paja1, 6-7 m	6,29- 6,32 m 6,81- 6,83 m	sandig sandig
La Paja1, 7-8 m	7,30- 7,32 m 7,90- 7,92 m	sandig sandig

4.3 Magnetische Suszeptibilität

Unter der magnetischen Suszeptibilität (Mag. Sus.) wird die Magnetisierbarkeit von Mineralen verstanden. Diese ist vergleichbar mit der Wirkung eines Magneten auf die

Minerale eines Gesteins, wenn sie außerhalb eines Gesteinsverbandes vorliegen: Die Minerale können zum Magneten hinstreben, nur auf direkten Kontakt zum Magneten reagieren oder überhaupt keine Reaktion zeigen. Dabei nimmt die magnetische Suszeptibilität ab (Dearing 1999).

Durch die Messung der Mag. Sus. können z.B. eisenhaltige Minerale identifiziert und deren Konzentration bestimmt, sowie verschiedene Bildungs- und Transportprozesse der Materialien erfasst werden. Die Mag. Sus. kann im Feld oder auch im Labor (Abb. 8) schnell und an allen Materialien bestimmt werden (Dearing 1999). Ein weiterer Vorteil der Methode ist, dass sie non-destruktiv ist, also keine Veränderungen oder Zerstörung des untersuchten Materials bewirkt.

Für Klimaforschungen wurde die magnetische Suszeptibilität zum Beispiel durch Kukla et al. (1988) als Proxy zur Datierung des Paläoklimas in Lössgebieten in China genutzt. Maher und Thompson (1995) haben ebenfalls in China Löss untersucht und durch systematische Änderungen in der Konzentration und Größe der magnetisierbaren Minerale Rückschlüsse auf Stadiale und Interstadiale, sowie Glaziale und Interglaziale ziehen können. Sie haben dabei einen verstärkenden Einfluss des Klimas, vor allem des Niederschlags, auf die magnetische Suszeptibilität auf der Nordhemisphäre feststellen können.

Für die Proben des Salzsees *Laguna de la Paja* wurde die Mag. Sus. im Labor mit einem Messintervall von einem Zentimeter bestimmt, für die Proben der *Laguna Hondilla* wurden je nach vorhandener Probenmenge zwei bis fünf Messungen durchgeführt, deren Messergebnisse gemittelt in die Untersuchung eingehen. Zur Messung wurde das Bartington MS2 System verwendet, die Ergebnisse sind in SI-Einheiten angegeben.



Abb. 8: Messen der magnetischen Suszeptibilität im Labor.

4.4 Röntgenfluoreszenzanalyse

Die Röntgenfluoreszenzanalyse ist eine physikalische, zerstörungsfreie Methode zur qualitativen und quantitativen Bestimmung der in einer Probe vorhandenen Elemente.

Röntgenstrahlen wurden 1898 von Wilhelm Röntgen entdeckt (Jenkins 1999). Zur Erzeugung dieser Strahlen werden bei der Röntgenfluoreszenzanalyse Elektronen mit hoher Energie auf ein *Target* genanntes Plättchen aus Metall geschossen, das dann Röntgenstrahlen emittiert (Markl 2008). Werden diese Strahlen auf die zu untersuchende Probe geschossen, bewirken sie, wie in Abb. 9 erkennbar, das Herausschlagen von kernnahen Elektronen. Die entstandenen Lücken werden fast sofort durch Elektronen höheren Energie-Niveaus ersetzt, die überschüssige Energie dieser Elektronen wird dabei in Form eines Röntgen-Photons freigesetzt.

Sind die ersetzten Elektronen aus einer K-Schale, so werden K-Strahlen emittiert, sind sie aus einer L-Schale, werden L-Strahlen emittiert. Zusätzlich unterscheidet man nach dem Ursprung der ersetzenden Elektronen nach α - und β -Strahlen: Bei einem Übergang von Elektronen von der M-Schale zur K-Schale werden $K\alpha$ -, von der L-Schale zur K-Schale $K\beta$ -Strahlen emittiert (Abb. 9) (Kalnicky & Singhvi 2001).

Die Wellenlängen dieser Photonen sind für jedes Element charakteristisch und ermöglichen die qualitative Bestimmung. Die Menge gibt Aufschluss über die Quantität oder Konzentration der Elemente (Piorek 1994).

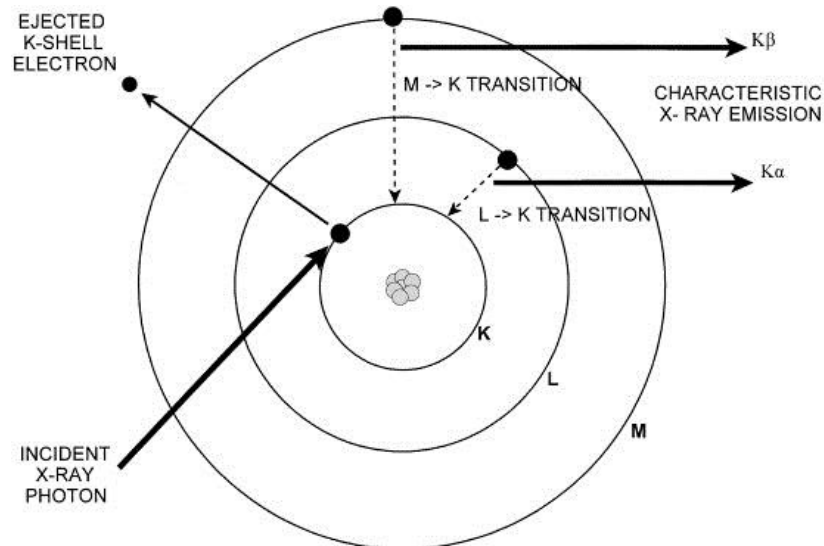


Abb. 9: Mechanismus der Röntgenfluoreszenz eines Atoms (Kalnicky & Singhvi 2001).

In Abb. 10 ist der Aufbau eines typischen Röntgenfluoreszenz-Spektrometers gezeigt: Eine Quelle sendet die Röntgenstrahlen auf die Probe aus, woraufhin diese ihre element-spezifischen Röntgenstrahlen emittiert. Diese werden von einem Detektor aufgenommen und analysiert (Kalnicky & Singhvi 2001).

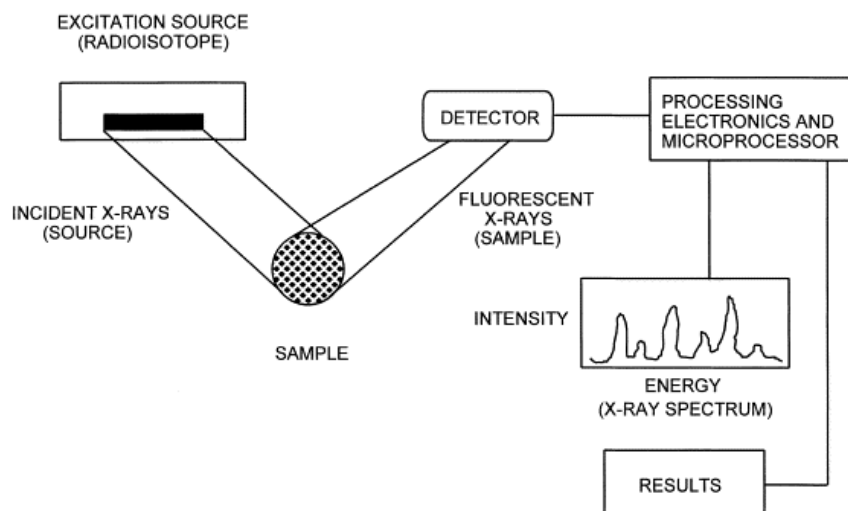


Abb. 10: Aufbau eines Röntgenfluoreszenzspektrometers (Kalnicky & Singhvi 2001).

Für die Untersuchung der Seesedimente wurde das tragbare Messgerät XLt 700 Series Environmental Analyzer der Firma Niton mit einem Silber-Target verwendet, das gleichzeitig 22 Elemente messen kann (Schmidt-Wygasch et al. 2010). Die Messdauer betrug 30 Sekunden. Die Proben der *Laguna de la Paja* wurden in einem Messintervall von 1 cm gemessen, mit dem Material der *Laguna Hondilla* wurde jeweils eine Messung pro Probenbeutel durchgeführt.

5 Darstellung der Messergebnisse

5.1 Sedimentologische Untersuchung

Bei der sedimentologischen Untersuchung (Tabelle mit Ergebnissen im Anhang auf CD) wurde unter anderem die Bodenart bestimmt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Form von Bohrprofilen in Abb. 11 zu sehen. Die Profile wurden mit dem Programm Profil Tec der Firma GeoLogik Software GmbH erstellt. Die Bodenart reicht von Sand und Feinsand bis Schluff und Ton, die sandigen Lagen überwiegen quantitativ. Die Mächtigkeit der einzelnen Schichten liegt zwischen 3 cm und 1,64 m, dabei sind die schluffigen Partien größtenteils weniger mächtig, als die sandigen.

Die Ergebnisse der Erfassung der Mikrofossilien sind in Tab. 4 dargestellt. In den älteren Abschnitten in 7-8 m und in 4-5 m Tiefe sind viele Mikrofossilien vorhanden.

In der Probe aus 7,90-7,92 m sind nicht bestimmbare Schalenbruchstücke, Ostracoden, Characeen und verschiedene Typen von Foraminiferen zu finden. Bei Ostracoden handelt es sich um Muschelkrebse, deren zweiteilige Schale sehr häufig im Sediment erhalten bleibt, weil sie leicht fossilisiert (Cohen 2003). Sie leben in Frisch- bis hypersalinem Wasser (Haq & Boersma 1998). Foraminiferen sind einzellige Lebewesen, die in 5 bis 500 m Wassertiefe im Ozean vorkommen. Man unterscheidet zwischen benthischen und planktonischen Foraminiferen, die *Ammonia* gehört zum ersten, *Globigerina* zum zweiten Typ (Haq & Boersma 1998).

Die Probe aus 7,30-7,32 m Tiefe enthält ebenfalls Foraminiferen und Schalenbruchstücke und zusätzlich ein Bruchstück, vermutlich von einem Seeigel-Stachel. Im Entnahmebereich 4,70-4,72 m wurden Ostracoden, eine Foraminifere, Bioklasten und eine juvenile Muschelschale gefunden.

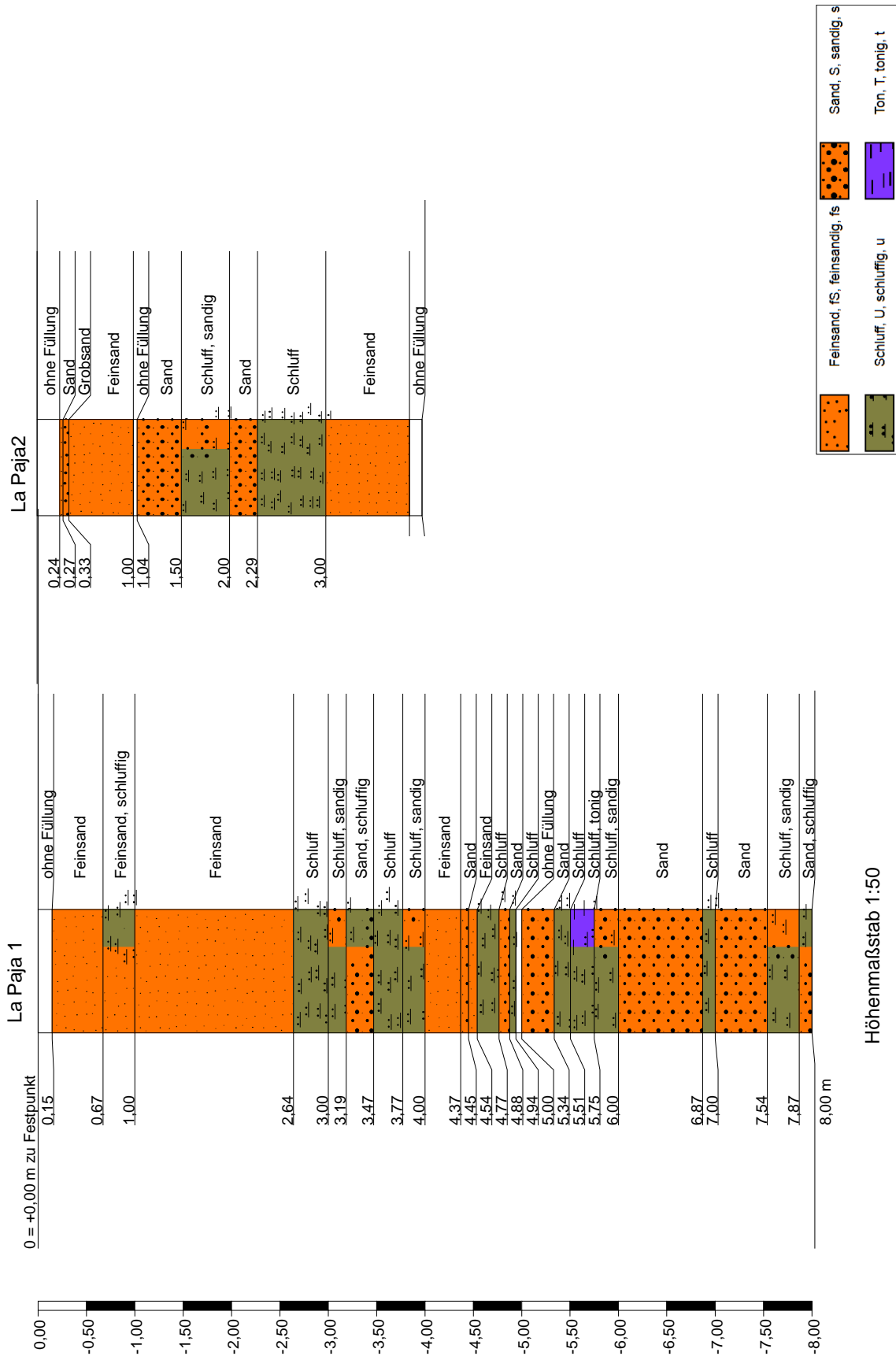


Abb. 11: Bohrprofile der Bohrungen La Paja1 und La Paja2.

Die anderen Proben waren teilweise ohne Fund oder enthielten nur wenige Holzreste und einzelne Bioklasten.

Tab. 4: Ergebnisse der Erfassung von Mikrofossilien.

La Paja1, 1-2 m	1,50-1,52 m	Holzstückchen
La Paja1, 3-4 m	3,32-3,34 m	Holzstückchen Bioklast, nicht bestimmbar
La Paja1, 4-5 m	4,40-4,42 m	kein Fund
	4,70-4,72 m	Ostracoden, glatt und mit Poren Bioklasten, nicht bestimmbar Foraminifere, marin juvenile Muschel, diagenetische verändert
La Paja1, 5-6 m	5,28-5,30 m	Holzstückchen Bioklast, nicht bestimmbar
La Paja1, 6-7 m	6,29-6,32 m	Bioklast, nicht bestimmbar
	6,81-6,83 m	kein Fund
La Paja1, 7-8 m	7,30-7,32 m	Schalenbruchstücke, nicht weiter bestimmbar vermuteter Seeigel- Stachel Foraminiferen vom Typ <i>Globigerina</i> und <i>Globigerina</i> -ähnliche Foraminiferen vom Typ <i>Ammonia</i>
	7,90-7,92 m	Ostracoden, glatt und mit Poren, teilweise geschlossen Characeen und Reste von Characeen Foraminiferen vom Typ <i>Globigerina</i> - ähnliche Foraminiferen vom Typ <i>Ammonia</i> und weitere rotaliide Gattungen zweireihige Foraminiferen der Überfamilie Buliminacea

5.2 Magnetische Suszeptibilität und Röntgenfluoreszenzanalyse

Bei der Untersuchung der magnetischen Suszeptibilität an den La Paja-Bohrkernen wurden mit einem Messintervall von einem Zentimeter Messwerte in SI-Einheiten bestimmt und mit Excel auf der Gesamtlänge der Bohrung dargestellt. Für die Proben der Hondilla-Bohrung wurden die Einzelwerte auf der Länge des Entnahmebereichs dargestellt.

Die Messergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse waren ebenfalls als Einzelwerte für jeden beprobten Zentimeter vorhanden und wurden auf der Länge der Bohrung dargestellt. Messreihen der Elemente, die keine oder nur sehr weniger Einzelwerte enthielten, wurden nicht dargestellt und von der weiteren Untersuchung ausgenommen (siehe Tab. 5). Auf der x-Achse wurde der Gehalt in SI-Einheit für die Mag. Sus. und in ppm für die Elemente dargestellt, auf der y-Achse die Tiefe in m. Die unbearbeiteten Rohmesswerte sind auf der CD im Anhang zu finden, die Diagramme mit den Messwerten der einzelnen Elemente im Anhang dieser Arbeit.

Für die Darstellung in Excel wurden die einzelnen Messwerte aus Gründen der Anschaulichkeit miteinander verbunden. Dies soll nicht suggerieren, dass dazwischen liegende Werte auf diesen Verbindungslinien liegen.

Bei einigen Messreihen (z.B. Vanadium, vgl. Anhang 2) waren auch einzelne Werte vorhanden. Um diese dennoch in Excel darstellen zu können, wurden in diesen Fällen die Einzelwerte zusätzlich als Kreuze dargestellt.

Messlücken sind in den Diagrammen als graue Balken zu erkennen. Diese können zwei Ursachen haben: Zum Teil waren die Liner nicht ganz gefüllt, diese Messlücken sind als Balken und zusätzlich als weiße Flächen in den Bohrprofilen gezeigt. An anderen Stellen wurde die Messung durch Steine im Liner verhindert, diese Messlücken sind nur durch die grauen Balken dargestellt.

Tab. 5: Übersicht über gemessene Werte. (✓=Messergebnisse in ausreichender Menge vorhanden; - =Messergebnisse nicht ausreichend vorhanden; X= keine Messergebnisse vorhanden).

Messwert	La Paja1	La Paja2	Hondilla
Mag. Sus.	✓	✓	✓
K	✓	✓	✓
Ca	✓	✓	✓
Sc	✓	✓	✓
Ti	✓	✓	✓
V	✓	✓	✓
Cr	✓	X	X
Mn	✓	✓	✓
Fe	✓	✓	✓
Co	✓	X	✓
Ni	✓	-	✓
Cu	✓	X	X
Zn	✓	✓	✓
As	-	-	X
Se	-	X	X
Rb	✓	✓	✓
Sr	✓	✓	✓
Ag	✓	-	✓
Cd	-	-	X
Sn	X	-	X
Sb	✓	-	X
Hg	✓	X	X
Pb	✓	X	X

Zur Vorbereitung der Auswertung der aus magnetischer Suszeptibilität (Mag. Sus.) und Röntgenfluoreszenzanalyse gewonnenen Daten wurden zunächst die Elemente ausgewählt,

für die eine Auswertung im Rahmen dieser Arbeit möglich ist. Diese Elemente wurden auf Gemeinsamkeiten im Verlauf der Graphen untersucht. Generell lassen sich starke Fluktuationen (Zick-Zack-Linien) in allen Verläufen finden, die jedoch an manchen Stellen tendenziell zu einem lokalen Hoch an- bzw. zu einem lokalen Tiefpunkt absteigen. Die Bereiche mit Hochpunkten wurden mit einem blauen, Bereiche mit Tiefpunkten mit einem grünen Rahmen versehen. Die Pfeile zeigen die Tendenz an.

Die Ergebnisse von La Paja1 können in zwei Abschnitte unterteilt werden; Abschnitt 1 von 0-4 m und Abschnitt 2 von 4-8 m (vgl. Abb. 12).

In Abschnitt 2 (Abb. 12) ließen sich Gemeinsamkeiten zwischen den Elementen Titan (Ti), Vanadium (V), Kupfer (Cu), Zink (Zn), Rubidium (Rb), Strontium (Sr) und Blei (Pb) feststellen. Lokale Maxima befinden sich jeweils bei 7,45-7,80 m, bei 6,65-7,00 m, bei 5,50-5,80 m und bei 4,40-4,90 m. Vor dem Anstieg der Messwerte sind lokale Tiefpunkte vorhanden, diese befinden sich in 7,05-7,15 m Tiefe, bei 5,85-6,05 m und bei 4,95-5,05 m. Bei Pb sind nur die jeweils zwei letztgenannten Hoch- und Tiefpunkt deutlich zu erkennen.

In Abschnitt 1 (Abb. 13) bestehen Gemeinsamkeiten zwischen den Ergebnissen der Mag. Sus. und den Elementen Kalium (K), Calcium (Ca), Rubidium (Rb), Strontium (Sr), Mangan (Mn) und Eisen (Fe). Die Elemente zeigen bei 3,80-4,00 m besonders hohe Messwerte die zum Bereich 3,05-3,35 m hin abfallen. Der darauf folgende Anstieg mündet in einem lokalen Maximum bei 2,30-2,75 m. Bei 2,00-2,15 m befindet sich ein weiteres lokales Minimum, auf das bei 1,70-1,95 m ein lokales Maximum folgt. Von dort ist ein tendenzielles Absinken der Werte zu sehen mit dem Minimum bei 0,65-1,00 m. Im Bereich von 0,65 m Tiefe bis zum oberen Ende der Messreihe ist wieder ein tendenzieller Anstieg der Elementgehalte zu erkennen.

Die Ergebnisse der für die La Paja2-Bohrung ausgewählten Elemente (Mag. Sus, K, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Rb, Sr) bedurften keiner Einteilung in Abschnitte, da der Verlauf der Graphen für alle Elemente ähnliche Tendenzen zeigte (Abb. 14 und Abb. 15).

Am tiefsten Punkt der Bohrung bei 3,87 m ist ein lokaler Hochpunkt zu erkennen. Die Messwerte sinken, mit Ausnahme derer von Mag. Sus. und des Elements Titan, bis zum Bereich von 3,00-3,05 m auf ein lokales Minimum ab. Bei der Mag. Sus. ist bei 3,37 m, bei Titan bei 3,67 m ein zusätzliches Maximum zu sehen. Der Bereich von 2,30-3,00 m stellt einen größeren Abschnitt von fluktuierenden hohen Messwerten dar. Einzelne Spitzenwerte

sind bei der Mag. Sus. und den Elementen Ca, V und Mn zu finden. Letzteres weist ab dort bis zum obersten Abschnitt zu wenig Messwerte für einen Trend auf. Daran anschließend fallen die Werte auf ein lokales Minimum im Bereich von 2,00-2,10 m ab. Nach der Messlücke ist ein sprunghafter Anstieg im Bereich 1,95-2,00 m zu sehen. Bis 0,45 m sinken die Werte auf einen lokalen Tiefpunkt. Eine Ausnahme bildet die Mag. Sus., die zwar tendenziell ebenfalls absinkt, jedoch bei 1,37 m einen lokalen Hochpunkt erreicht und erst anschließend wieder sinkt. Im obersten Bereich der Bohrung bei 0,25-0,35 m sind noch einmal lokale Maxima zu finden.

Messergebnisse der Hondilla-Bohrung sind nur für die beprobten Abschnitte vorhanden. Aufgrund der geringen Anzahl an Messungen lassen sich in den Verläufen der Messwerte zwar Tendenzen erkennen, lokale Maxima und Minima sind jedoch nur schwer identifizierbar und stimmen unter Umständen nicht mit den tatsächlichen Gegebenheiten überein (Abb. 16 und Abb. 17).

Gemeinsamkeiten sind bei den Messwerten von K und Ca festzustellen, die im Bereich von 4,60 m ein lokales Minimum aufweisen, sowie ein weiteres bei 2,30 m, gefolgt von einem Hochpunkt bei 1,80 m. Zwischen den beiden Minima unterscheiden sich die Verläufe: Bei Ca ist ein lokaler Hochpunkt bei 3,80 m zu identifizieren, bei K zwei Hochpunkte im Bereich von 4,30 m und 3,60 m, zwischen denen bei 3,90 m ein lokaler Tiefpunkt liegt.

Die Messwerte von Ti zeigen ein lokales Minimum bei 4,80 m und steigen tendenziell bis 4,30 m an. Bei 3,90 m liegt erneut ein Tiefpunkt, die Werte steigen von dort bis zu einem lokalen Maximum bei 2,70 m an und fallen anschließend bis zu einer Tiefe von 1,60 m ab. Der Verlauf der V-Werte zeigt ebenfalls einen Tiefpunkt bei 4,80 m, steigt dann bis 4,50 m an und fällt anschließend bis 3,20 m auf ein lokales Minimum. In einer Tiefe von 2,70 m erreichen die Werte wieder ein lokales Maximum und fallen in der Tendenz bis zum obersten Messwert in einer Tiefe von 2,30 m.

Die Messwerte von Mn haben einen Tiefpunkt bei 4,70 m, ein besonders hoher Wert wurde bei 4,20 m gemessen, sowie bei 3,20 m und 2,30 m. Lokale Minima sind bei 3,85 m und 2,70 m vorhanden.

Der Verlauf der Messwerte der Mag. Sus., von Fe und Rb zeigen vom tiefsten Punkt des beprobten Bereichs in 5 m Tiefe zum höchsten Punkt in 1,40 m Tiefe eine graduelle Abnahme der Elementgehalte.

Die Messwerte von Sr haben ein lokales Minimum bei 4,55 m. Sie steigen anschließend bis zum Maximalwert in einer Tiefe von 2,70 m an und sinken bis zum höchsten Messbereich in 1,40 m Tiefe auf ein lokales Minimum.

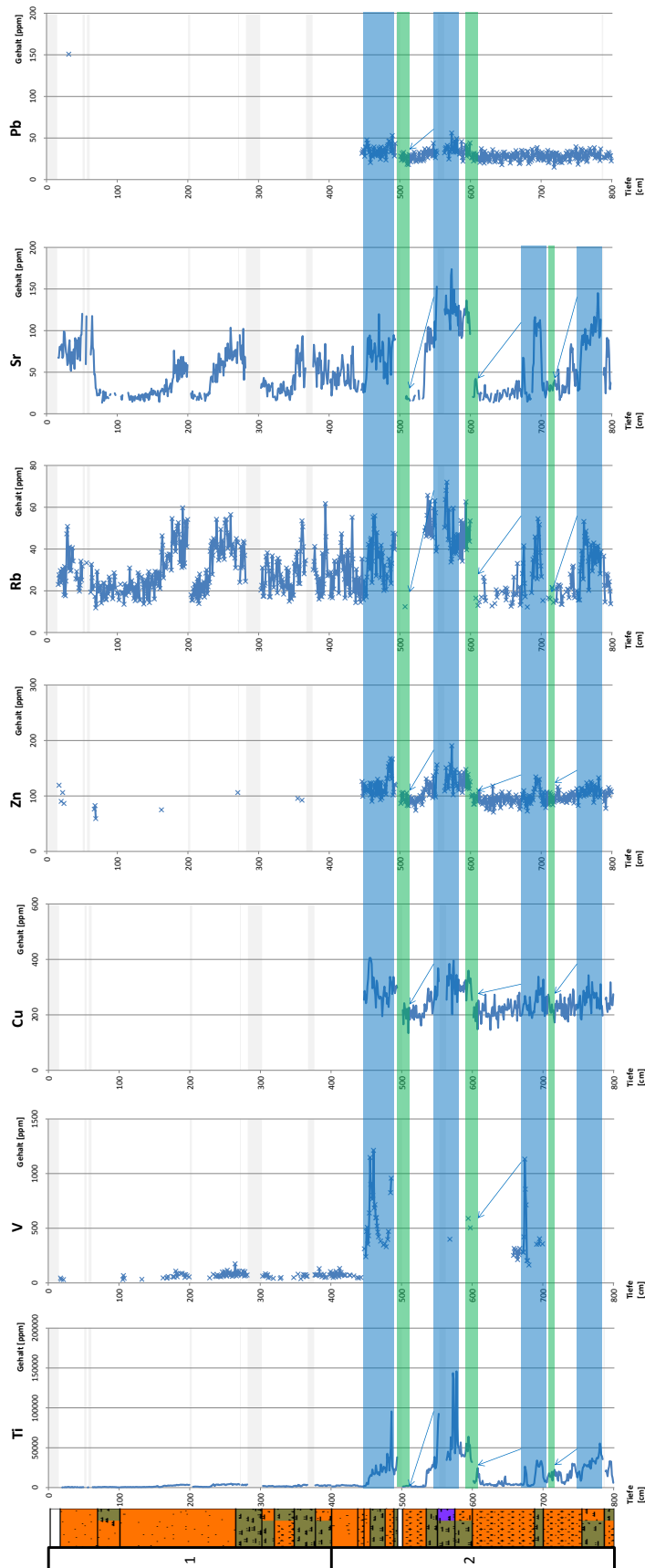


Abb. 12: Gemeinsamkeiten und Tendenzen von Titan (Ti), Vanadium (V), Kupfer (Cu), Zink (Zn), Rubidium (Rb), Strontium (Sr) und Blei (Pb) in Abschnitt 2 der Bohrung La Paja1 mit Bohrprofil (Legende in Abb. 11). Blaue Rahmen zeigen lokale Maxima, grüne lokale Minima, Pfeile zeigen Tendenzen.

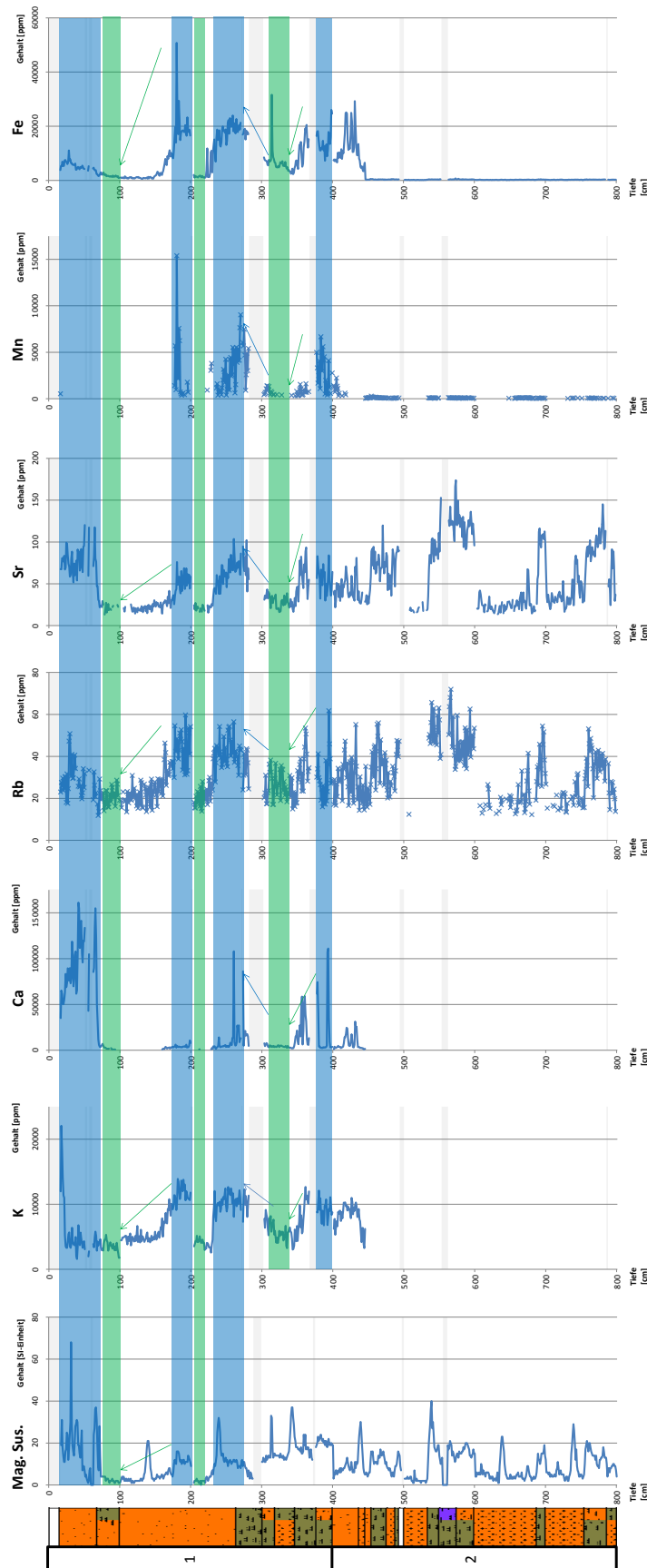


Abb. 13: Gemeinsamkeiten und Tendenzen der magnetischen Suszeptibilität (Mag. Sus.) und von Kalium (K), Calcium (Ca), Rubidium (Rb), Strontium (Sr), Mangan (Mn) und Eisen (Fe) in Abschnitt 1 der Bohrung la Paja1 mit Bohrprofil (Legende in Abb. 11). Blaue Rahmen zeigen lokale Maxima, grüne lokale Minima, Pfeile zeigen Tendenzen.

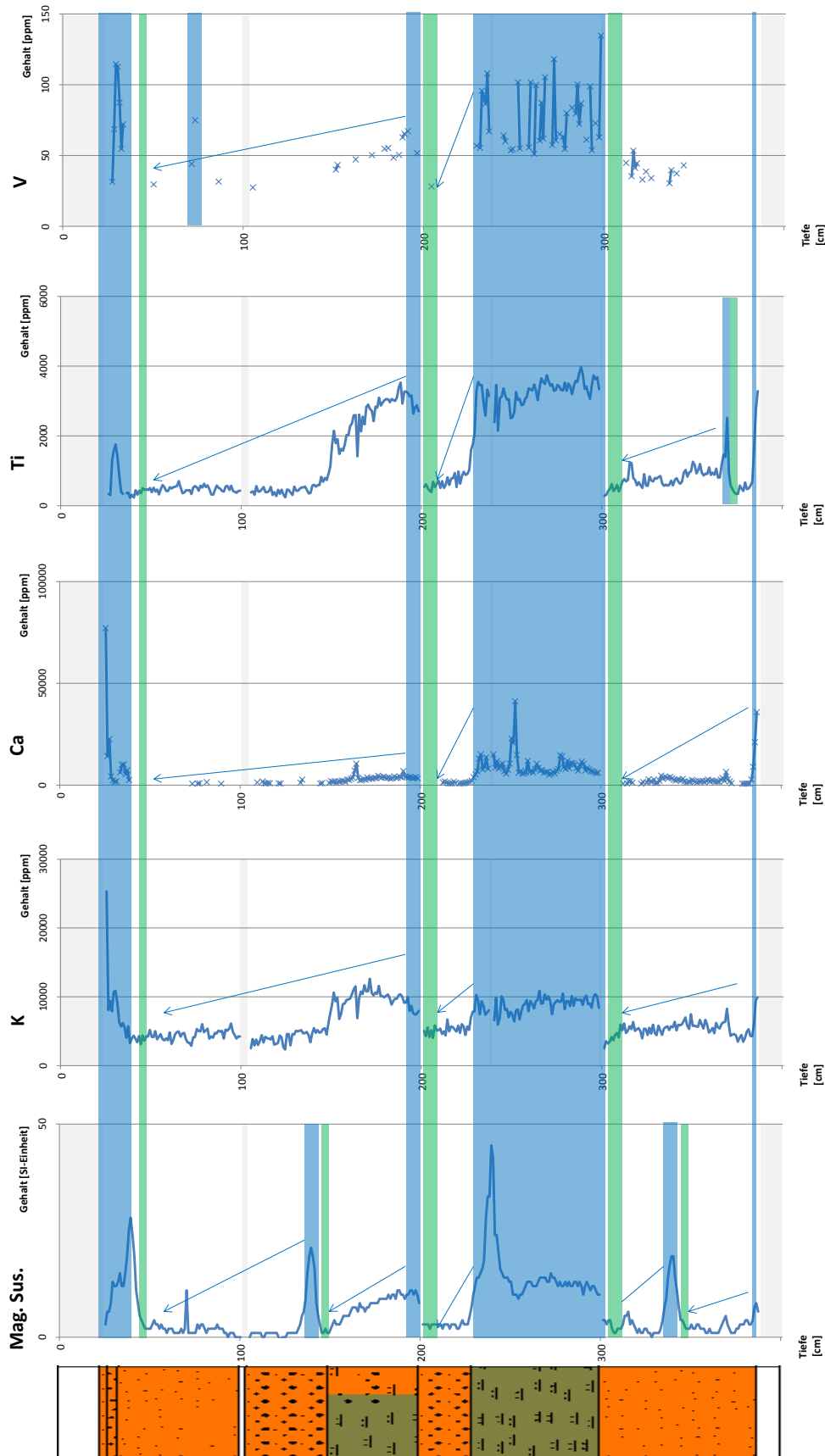


Abb. 14: Gemeinsamkeiten und Tendenzen der magnetischen Suszeptibilität (Mag. Sus.) und der Elemente Kalium (K), Calcium (Ca), Titan (Ti) und Vanadium (V) der Bohrung La Paja2 mit Bohrprofil (Legende in Abb. 11). Blaue Rahmen zeigen lokale Maxima, grüne lokale Minima, Pfeile zeigen Tendenzen.

Darstellung der Messergebnisse

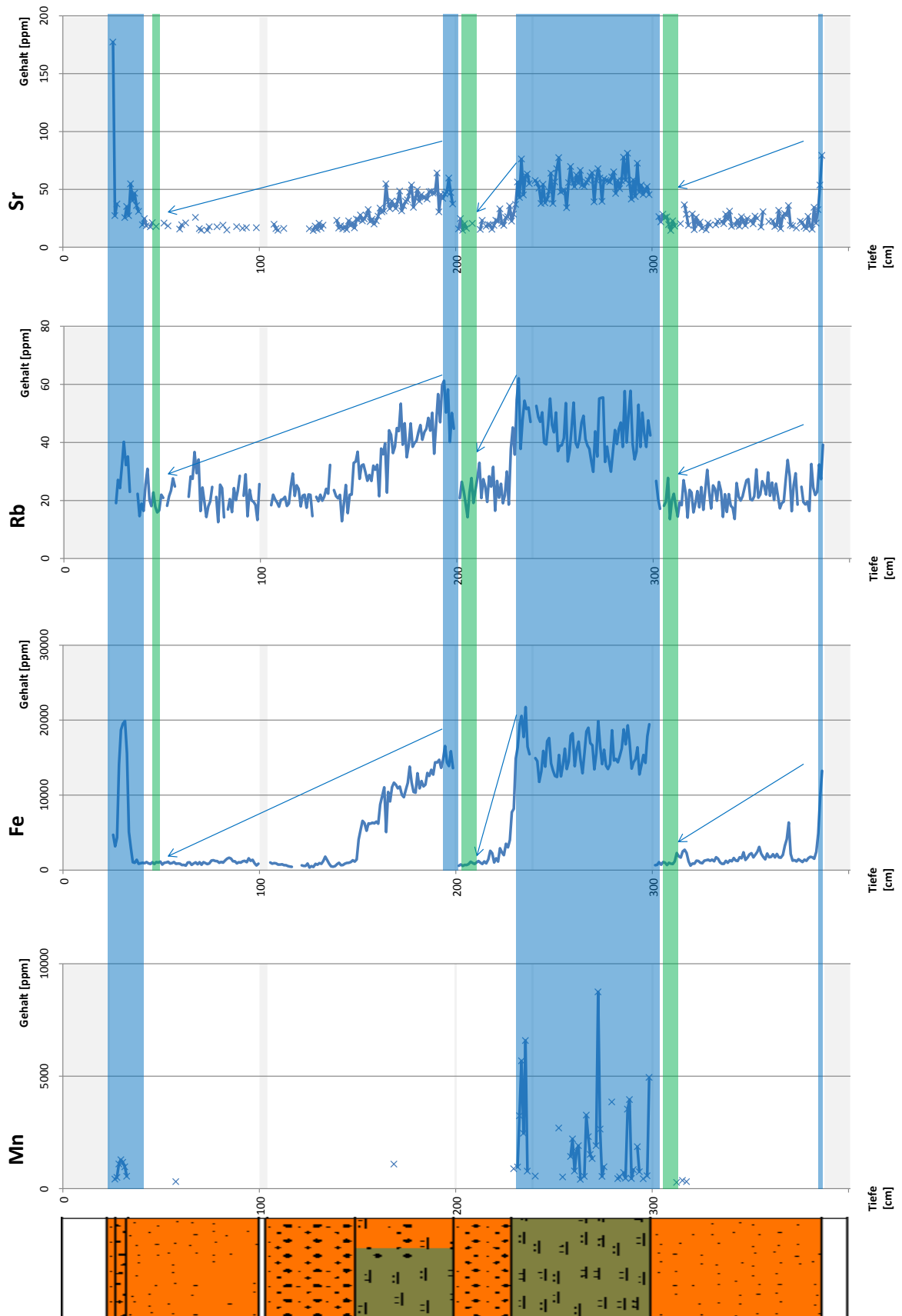


Abb. 15: Gemeinsamkeiten und Tendenzen der Elemente Mangan (Mn), Eisen (Fe), Rubidium (Rb) und Strontium (Sr) der Bohrung La Paja2 mit Bohrprofil (Legende in Abb. 11). Blaue Rahmen zeigen lokale Maxima, grüne lokale Minima, Pfeile zeigen Tendenzen.

Darstellung der Messergebnisse

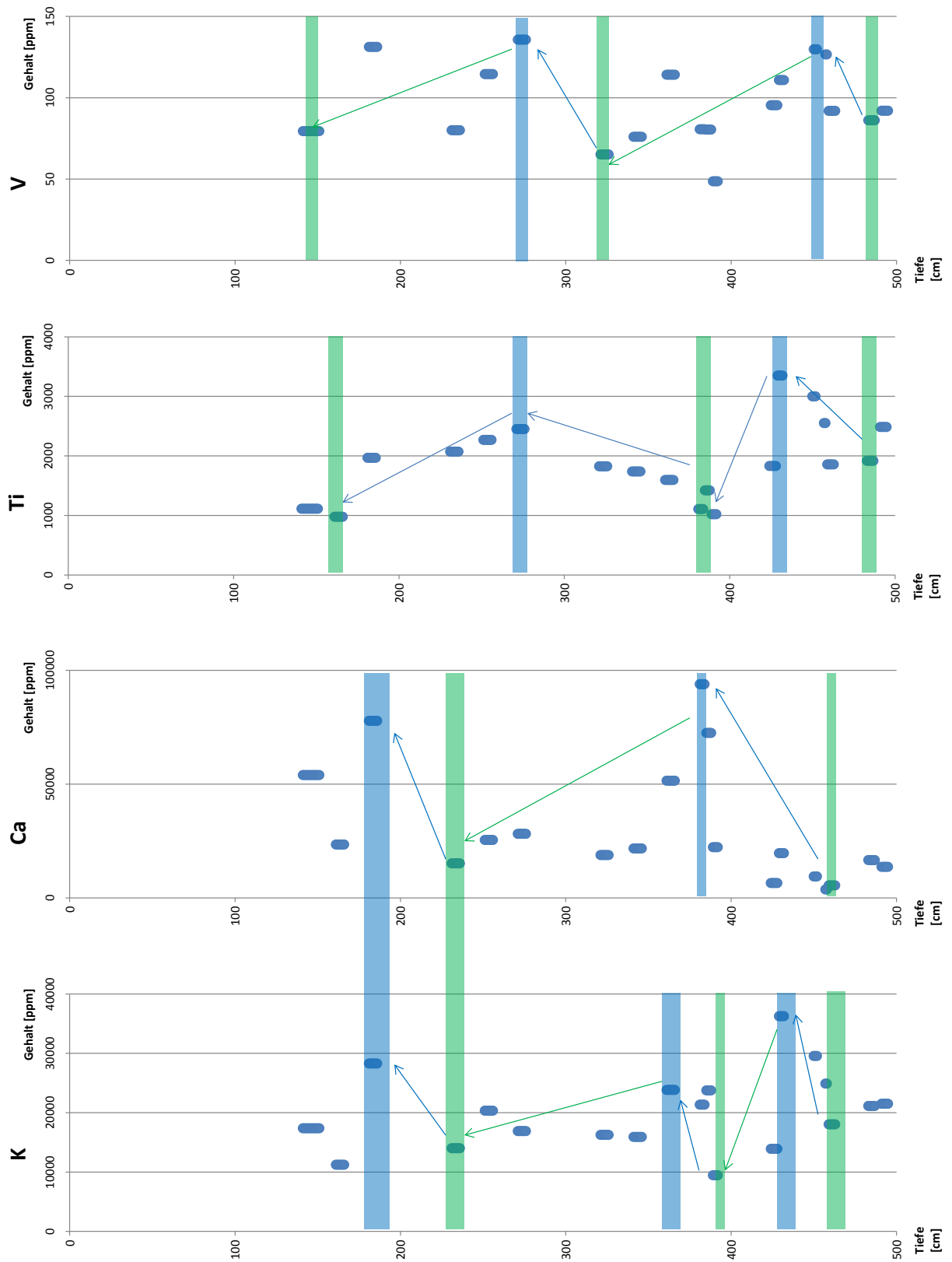


Abb. 16: Maxima (blau), Minima (grün) und Tendenzen (Pfeile) der Elemente Kalium (K), Calcium (Ca), Titan (Ti) und Vanadium (V) der Bohrung Hondilla.

Darstellung der Messergebnisse

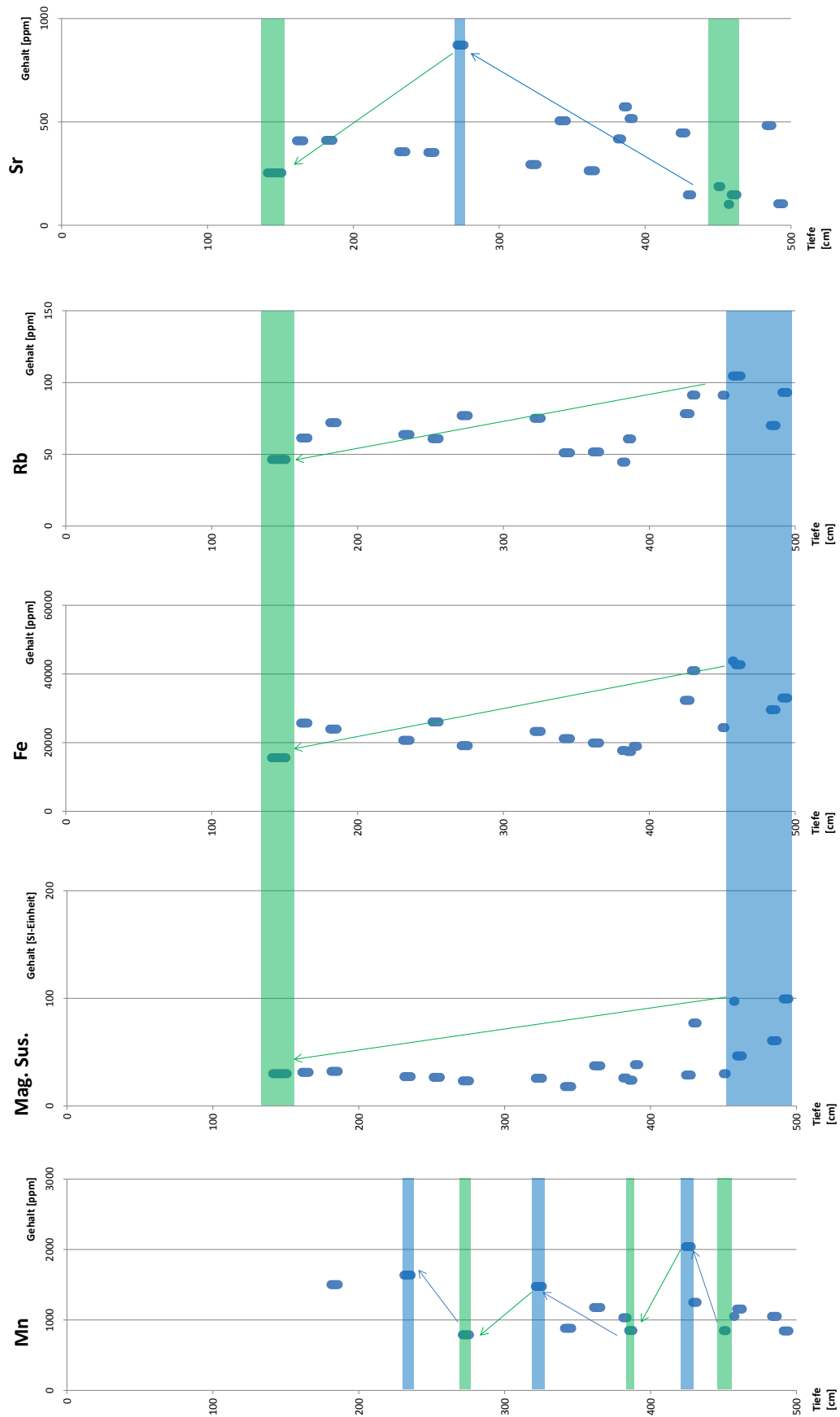


Abb. 17: Maxima (blau), Minima (grün) und Tendenzen (Pfeile) der Messergebnisse von Mangan (Mn), der magnetischen Suszeptibilität (Mag. Sus.), Eisen (Fe), Rubidium (Rb) und Strontium (Sr) der Bohrung Hondilla.

6 Auswertung und Interpretation

Aus den Ergebnissen der Mikrofossilien-Untersuchung (Kapitel 5.1) der La Paja1-Bohrung lässt sich ableiten, dass zur Zeit der Ablagerung der untersuchten Sedimente aus 7-8 m Tiefe ein mariner Einfluss auf die *Laguna de la Paja* vorhanden war. Möglicherweise sind diese Ablagerungen älter als das Quartär.

Die geschlossene Ostracoden-Schale, die im Bereich von 7,90-7,92 m gefunden wurde, zeigt an, dass das Sediment nachträglich nicht bewegt wurde, da die Schale sonst in zwei Hälften zerteilt worden wäre. Dies könnte ein Hinweis auf anoxische Bedingungen ohne Bioturbation oder sehr schnelle Sedimentationsraten sein.

Die Funde von Ostracoden, einer Muschel, sowie einer Foraminiferen im Bereich 4,70-4,72 m könnten ebenfalls als mariner Einfluss gedeutet werden, es ist jedoch auch eine andere Deutung möglich: Die Ostracoden könnten dem Salzsee entstammen, die Muschel, da sie diagenetisch überprägt ist, sowie die Foraminifere, da nur eine einzelne gefunden wurde, aufgearbeitet oder von außen eingetragen worden sein.

Beim Vergleich der bearbeiteten Werte der Mag. Sus. und den Elementen mit den Funden der Mikrofossilien lassen sich keine Zusammenhänge feststellen. Ebenso verhält es sich bei beiden Bohrungen La Paja1 und La Paja2 im Vergleich mit der Bodenart, die offenbar nicht im Zusammenhang mit dem Elementgehalt steht (vgl. Abb. 12 und Abb. 13).

Da die zwei Bohrungen an der *Laguna de la Paja* in nur wenig Entfernung voneinander abgeteuft wurden, kann vermutet werden, dass die Elementgehalte in der Tiefe einen ähnlichen Verlauf zeigen. Der Vergleich der ausgewählten Elemente Kalium (K) und Titan (Ti) (bearbeitet, wie in Kapitel 5.2 auf Seite 24 beschrieben) in Abb. 18 zeigt größtenteils Übereinstimmungen zwischen den Messwerten aus La Paja1 und La Paja2, jedoch nicht in allen Bereichen. Dennoch wird für die Interpretation nicht jede Bohrung einzeln betrachtet, sondern nur La Paja1. Die Ausführungen sind aufgrund der räumlichen Nähe der Bohrungen und den im Verlauf ähnlichen Messwerten auf die Ergebnisse von La Paja2 übertragbar.

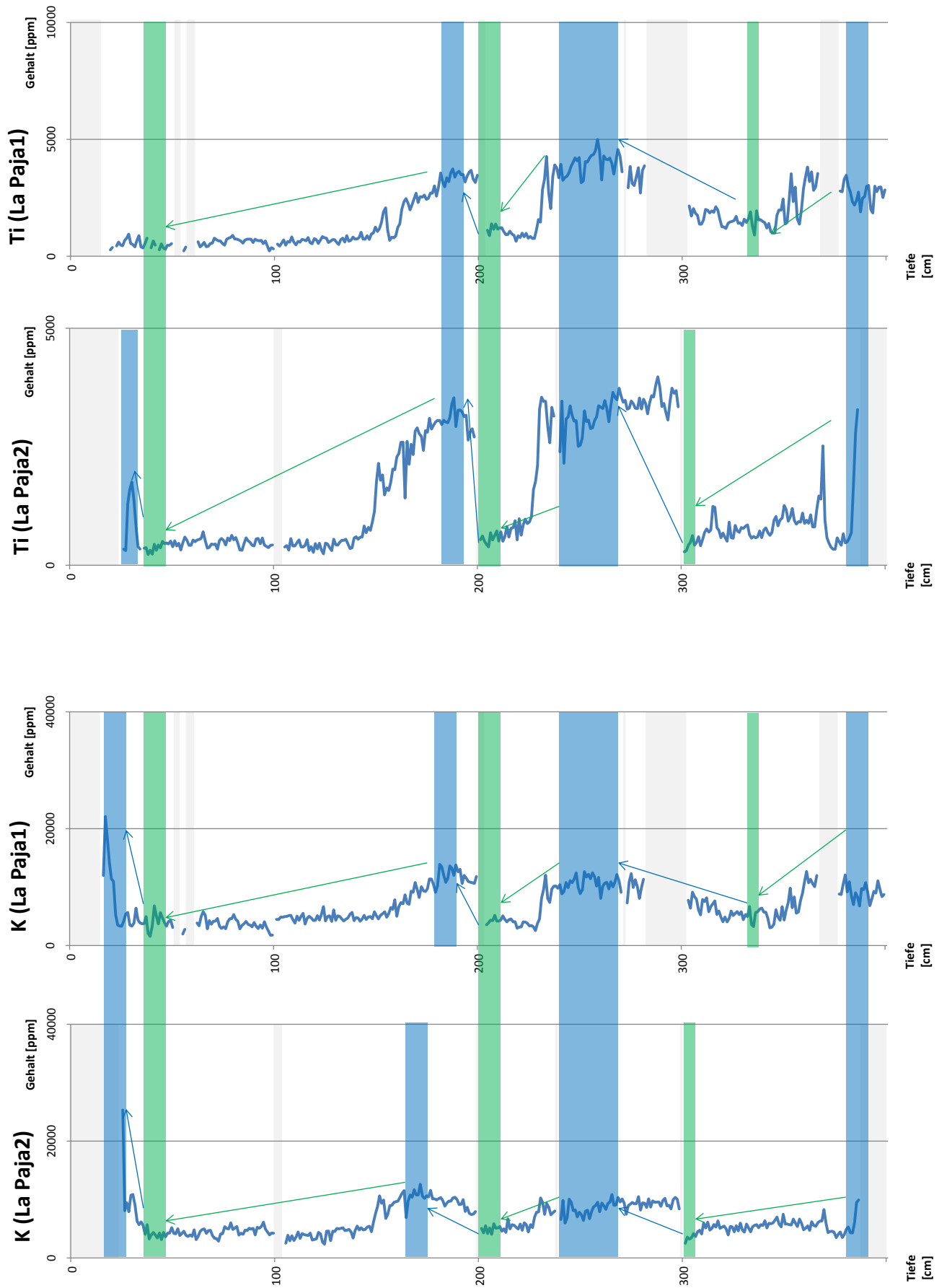


Abb. 18: Vergleich der Bohrungen La Paja1 und La Paja2 anhand der Elemente Titan (Ti) oben und Kalium (K) unten.

Nach Cohen (2003) zeigen erhöhte Werte von Cu und Zn einen Anstieg von organischen Anteilen im Sediment an, da sie mit organischen Stoffen Komplexe bilden. Dies könnte in den blau hinterlegten Tiefen in Abb. 12 auf einen hohen Anteil an organischem Material hinweisen.

Fe und Mn werden nach Cohen (2003), oft in wärmeren Perioden und Phasen erhöhter Bodenbildung abgelagert, dies jedoch in Abhängigkeit der vorherrschenden Redox-Bedingungen. Da diese im Salzsee nicht bekannt sind, können aus diesen Werten keine genaueren Rückschlüsse gezogen werden.

Der Anstieg von K, Ti, V, Rb und Pb kann laut Eusterhues et al. (2005) mit einem Anstieg der Erosion im Einzugsgebiet korreliert werden. Erhöhte Sr-Werte hängen nach Martín-Puertas et al. (2010) mit einer erhöhten Evaporation zusammen. K und Ca sind nach Cohen (2003) ebenfalls mit erhöhter Evaporation und damit hoher Salinität verbunden. Da die *Laguna de la Paja* aber von Kalksteinen umgeben ist (vgl. Kapitel 3), könnte ein Anstieg auch auf einen Eintrag von kalkreichem Wasser aus der Umgebung des Beckens hindeuten. Dies kann ebenfalls durch den gleichverlaufenden Anstieg der Mag. Sus.-Werte bekräftigt werden, die laut Bloemendal et al. (1992) Hinweise auf Karbonate geben. Ein Anstieg der Pb-Gehalte kann oft, so Koinig et al. (2003), mit Verschmutzung und Staub-Einträgen verbunden werden.

Da die Elemente, wie auf Abb. 12 und Abb. 13 zu erkennen, alle einen ähnlichen Verlauf anzeigen, könnte ein Anstieg des Gehaltes dieser Elemente (K, Ti, V, Rb, Pb, Ca) und der Mag. Sus. mit Phasen erhöhter Evaporation und Salinität, sowie erhöhter Erosion im Einzugsgebiet und Staub-Einträgen erklärt werden (Bloemendal et al. 1992; Eusterhues et al. 2005; Martín-Puertas et al. 2010; Cohen 2003; Koinig et al. 2003). Demnach könnten die in Abb. 12 und Abb. 13 blau umrahmten Bereiche für warme oder trockene Klima-Phasen stehen, die daran anschließenden Bereiche bis zu den grün umrahmten für kältere oder feuchtere Phasen (Bloemendal et al. 1992; Eusterhues et al. 2005; Martín-Puertas et al. 2010; Cohen 2003; Koinig et al. 2003).

Daraus können zeitliche Muster abgeleitet werden, in denen an warme Phasen eine graduelle Abkühlung anschließt, die wiederum von einem abrupten Temperaturanstieg gefolgt ist, ab dem sich das Muster wiederholt. Diese Muster könnten zu den in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Dansgaard-Oeschger-Zyklen passen. Diese Einschätzung ist jedoch ohne eine

zeitliche Einordnung der Sedimente zum Abgleich der Element-Fluktuationen mit der Dauer der DO-Zyklen nicht möglich.

Die Ergebnisse für die Bohrungen an der *Laguna de la Paja* sind in Abb. 19 zusammenfassend dargestellt.

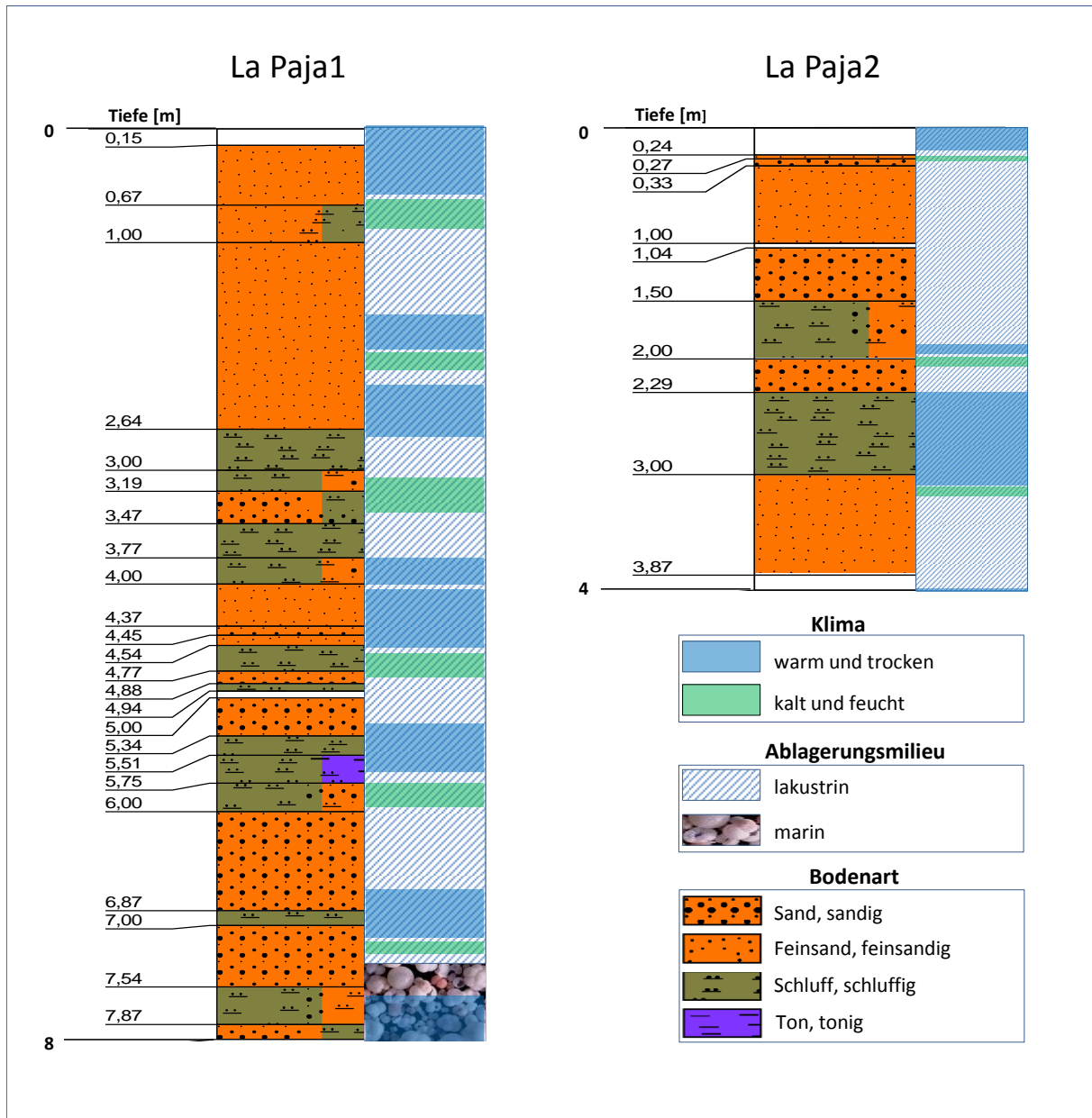


Abb. 19: Zusammenfassende Darstellung der Messergebnisse von La Paja1 und La Paja2.

Für die Auswertung der Messergebnisse der *Laguna Hondilla* liegen nicht genügend Messwerte vor, da nur Werte für die beprobten Bereiche vorhanden sind. Es ist kein genauer Verlauf der Elementgehalte verfügbar. Der Versuch der Darstellung der Maxima und Minima

in Abb. 16 und Abb. 17 zeigt zwar Tendenzen zu lokalen Hoch- und Tiefpunkten, diese könnten jedoch bei Verdichtung der Messung über die gesamte Länge des Bohrkerns nicht mit den tatsächlichen Maxima und Minima übereinstimmen.

7 Diskussion und Ausblick

Das Ziel der vorliegenden Bachelor-Arbeit war die Untersuchung der lithologischen und geochemischen Verhältnisse in den Salzseen *La Paja* und *Hondilla* mittels sedimentologischer Betrachtung, Messen der magnetischen Suszeptibilität und der Röntgenfluoreszenzanalyse zur Ermittlung von Hinweisen auf die klimatischen Verhältnisse im Quartär. In diesem Rahmen wurden in schluffigen und sandigen Abschnitten der La Paja1-Bohrung Mikrofossilien gefunden, die den Schluss nahelegen, dass zum Zeitpunkt ihrer Ablagerung marine Bedingungen vorherrschten. Grundsätzlich ist die Auswertung der Mikrofossilien jedoch kritisch zu betrachten, da nur eine geringe Menge des Probenmaterials untersucht wurde. Weiterhin wurden die Messergebnisse der magnetischen Suszeptibilität und der Röntgenfluoreszenzanalyse als Diagramme dargestellt, um einen Überblick über die Daten zu erlangen. Anschließend wurden Ergebnisse ausgewählter Elemente weiter bearbeitet, um daraus Rückschlüsse auf Warm- und Kalt-Phasen zu ziehen. Die Ergebnisse der La Paja-Bohrung aus Mag. Sus., K, Ti, V, Rb, Pb, K und Ca lassen ein Muster aus plötzlichen Warm- und langsamen Abkühlungsphasen erkennen, das möglicherweise mit den Dansgaard-Oeschger-Zyklen zusammenfällt. Eine zeitliche Einordnung der Sedimente ist für eine weitergehende Untersuchung notwendig. Die Muster treten mit einer Länge von ca. 1 m auf, bei einer Dauer von 500-3000 Jahren pro Dansgaard-Oeschger-Zyklus (Dansgaard et al. 1993) würde das eine Sedimentationsrate von 2-0,33 mm/Jahr voraussetzen, damit die Muster zu den Zyklen passen.

Aus den Ergebnissen der Hondilla-Bohrung konnten zwar tendenzielle Verläufe beschrieben, aufgrund der geringen Anzahl von Messwerten jedoch keine klimatischen Rückschlüsse gezogen werden.

Diese Ergebnisse geben nur einen ersten Ansatz zu den quartären klimatischen Verhältnissen um den Salzsee *La Paja*. Um genauere Rückschlüsse ziehen zu können, müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden: Zum einen sollten Bohrungen innerhalb des heutigen Salzsees durchgeführt werden, bei denen mit Hilfe von Vorerkundungen sichergestellt

werden kann, dass sie lakustrine Ablagerungen enthalten. Zum anderen sollten diese Sedimente genauer untersucht werden, z.B. auf den Gehalt an organischen Kohlenstoff oder auf Elemente, die mit dem Niton-Röntgenfluoreszenzmessgerät nicht erfasst werden konnten, um die Informationsdichte in der klimatische Betrachtung zu erhöhen. Zusätzlich kann die Betrachtung, Untersuchung und genaue Bestimmung der Mikrofossilien in den gesamten Bohrkernen weitere Hinweise auf die hydrobiologischen Bedingungen im Ablagerungszeitraum geben. Eine Datierung einzelner Abschnitte der Bohrung kann außerdem eine zeitliche Einordnung der Sedimente ermöglichen und somit den in dieser Arbeit vorgeschlagenen Zusammenhang zwischen den Elementfluktuationen und den Dansgaard-Oeschger-Zyklen unterstützen oder widerlegen. Möglicherweise ist dies auch durch einen Abgleich der nötigen Sedimentationsrate von 0,33-2 mm/Jahr mit bekannten Sedimentationsraten von Salzseen mit ähnlichen hydrogeologischen Verhältnissen in der Umgebung der *Laguna de la Paja* möglich.

Zur Untersuchung der klimatischen Verhältnisse an der *Laguna Hondilla* sollten erneut Bohrungen durchgeführt und das gewonnene Material genauer untersucht werden.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Mögliche Wanderrouten des modernen Menschen (SFB-806 2013).....	1
Abb. 2: Tektonische Struktur der Betischen Kordillere (Rodríguez-Rodríguez 2007).....	4
Abb. 3: Korrelation zwischen D/O-Zyklen, Heinrich-Events und Bond-Zyklen mit der $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopenverteilung nach Eric Grimm mit Daten von (Bond et al. 1993; Stoner et al. 2000; Sarnthein et al. 2001) aus (Graham 2005).	8
Abb. 4: Lage der <i>Laguna de la Paja</i> (A) und der <i>Laguna Hondilla</i> (B) in Spanien (1) und Südspanien (2) (Geoplaner n.d.).	11
Abb. 5: Lage der Bohrpunkte La Paja1 (A) und La Paja2 (B) (Geoplaner n.d.).	13
Abb. 6: Lage des Bohrpunktes Hondilla (A) (Geoplaner n.d.).	14
Abb. 7: Rammbohrung (links) und Entnahme von Proben aus einer Schlitz-Sonde (rechts). .	15
Abb. 8: Messen der magnetischen Suszeptibilität im Labor.....	18
Abb. 9: Mechanismus der Röntgenfluoreszenz eines Atoms (Kalnicky & Singhvi 2001).....	19
Abb. 10: Aufbau eines Röntgenfluoreszenzspektrometers (Kalnicky & Singhvi 2001).....	19
Abb. 11: Bohrprofile der Bohrungen La Paja1 und La Paja2.	21
Abb. 12: Gemeinsamkeiten und Tendenzen von Titan (Ti), Vanadium (V), Kupfer (Cu), Zink (Zn), Rubidium (Rb), Strontium (Sr) und Blei (Pb) in Abschnitt 2 der Bohrung La Paja1 mit Bohrprofil (Legende in Abb. 11). Blaue Rahmen zeigen lokale Maxima, grüne lokale Minima, Pfeile zeigen Tendenzen.....	27
Abb. 13: Gemeinsamkeiten und Tendenzen der magnetischen Suszeptibilität (Mag. Sus.) und von Kalium (K), Calcium (Ca), Rubidium (Rb), Strontium (Sr), Mangan (Mn) und Eisen (Fe) in Abschnitt 1 der Bohrung la Paja1 mit Bohrprofil (Legende in Abb. 11). Blaue Rahmen zeigen lokale Maxima, grüne lokale Minima, Pfeile zeigen Tendenzen.....	28
Abb. 14: Gemeinsamkeiten und Tendenzen der magnetischen Suszeptibilität (Mag. Sus.) und der Elemente Kalium (K), Calcium (Ca), Titan (Ti) und Vanadium (V) der Bohrung La Paja2 mit Bohrprofil (Legende in Abb. 11). Blaue Rahmen zeigen lokale Maxima, grüne lokale Minima, Pfeile zeigen Tendenzen.....	29
Abb. 15: Gemeinsamkeiten und Tendenzen der Elemente Mangan (Mn), Eisen (Fe), Rubidium (Rb) und Strontium (Sr) der Bohrung La Paja2 mit Bohrprofil (Legende in Abb. 11). Blaue Rahmen zeigen lokale Maxima, grüne lokale Minima, Pfeile zeigen Tendenzen.	30

Abb. 16: Maxima (blau), Minima (grün) und Tendenzen (Pfeile) der Elemente Kalium (K), Calcium (Ca), Titan (Ti) und Vanadium (V) der Bohrung Hondilla.	31
Abb. 17: Maxima (blau), Minima (grün) und Tendenzen (Pfeile) der Messergebnisse von Mangan (Mn), der magnetischen Suszeptibilität (Mag. Sus.), Eisen (Fe), Rubidium (Rb) und Strontium (Sr) der Bohrung Hondilla.	32
Abb. 18: Vergleich der Bohrungen La Paja1 und La Paja2 anhand der Elemente Titan (Ti) oben und Kalium (K) unten.....	34
Abb. 19: Zusammenfassende Darstellung der Messergebnisse von La Paja1 und La Paja2. ..	36

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Natürliche Klimaarchive verändert aus (Bradley 1999) nach (Bradley & Eddy 1991). ..	9
Tab. 2: Kriterien zur Bohrkernbeschreibung.	16
Tab. 3: Entnahmebereiche zur Untersuchung der Mikrofossilien aus den La Paja1- Bohrkernen.....	16
Tab. 4: Ergebnisse der Erfassung von Mikrofossilien.....	22
Tab. 5: Übersicht über gemessene Werte. (✓=Messergebnisse in ausreichender Menge vorhanden; - =Messergebnisse nicht ausreichend vorhanden; X= keine Messergebnisse vorhanden).....	23

Literaturverzeichnis

- Abrantes, F. et al., 2012. *The Climate of the Mediterranean Region: From the Past to the Future*. P. Lionello, ed., Elsevier.
- Andrieux, J., Fontbote, J.-M. & Mattauer, M., 1971. Sur un modele explicatif de l'arc de Gibraltar. *Earth and Planetary Science Letters*, 12(2), pp.191–198.
- Banks, C.J. & Warburton, J., 1991. Mid-crustal detachment in the Betic system of southeast Spain. *Tectonophysics*, 191(3-4), pp.275–289.
- Battarbee, R.W., 2000. Palaeolimnological approaches to climate change, with special regard to the biological record. *Quaternary Science Reviews*, 19(1-5), pp.107–124.
- Berástegui, X. et al., 1998. Lateral diapiric emplacement of Triassic evaporites at the southern margin of the Guadalquivir Basin, Spain. *Geological Society, London, Special Publications*, 134(1), pp.49–68.
- Birks, H.H. & Birks, H.J.B., 2006. Multi-proxy studies in palaeolimnology. *Vegetation History and Archaeobotany*, 15(4), pp.235–251. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s00334-006-0066-6> [Accessed August 14, 2013].
- Bloemendal, J. et al., 1992. Rock magnetism of Late Neogene and Pleistocene deep-sea sediments: Relationship to sediment source, diagenetic processes, and sediment lithology. *Journal of Geophysical Research*, 97(B4), p.4361.
- Blumenthal, M., 1927. Versuch einer tektonischen Gliederung der betischen Cordilleren von Central-und Südwest-Andalusien. *Eclogae Geol. Helv*, 20, pp.487–592.
- Bond, G. et al., 1997. A Pervasive Millennial-Scale Cycle in North Atlantic Holocene and Glacial Climates. *Science*, 278(5341), pp.1257–1266.
- Bond, G. et al., 1993. Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice. *Nature*, 365(6442), pp.143–147.
- Bond, G. et al., 1992. Evidence for massive discharges of icebergs into the North Atlantic ocean during the last glacial period. , 360(6401), pp.245–249.
- Bond, G. & Lotti, R., 1995. Iceberg discharges into the North Atlantic on millennial time scales during the last glaciation. *Science*, 267, pp.1005–1010.
- Bout-Roumazeilles, V. et al., 2007. Connection between South Mediterranean climate and North African atmospheric circulation during the last 50.000 yr BP North Atlantic cold events. *Quaternary Science Reviews*, 26(25-28), pp.3197–3215.
- Bradley, R.S., 1999. *Paleoclimatology, Volume 68, Second Edition: Reconstructing Climates of the Quaternary (International Geophysics)*, Academic Press.

- Bradley, R.S. & Eddy, J.A., 1991. Records of past global changes. *Global Changes of the Past*, pp.5–9.
- Bradtmöller, M. et al., 2012. The repeated replacement model – Rapid climate change and population dynamics in Late Pleistocene Europe. *Quaternary International*, 247, pp.38–49.
- Cacho, I. et al., 1999. Dansgaard-Oeschger and Heinrich event imprints in Alboran Sea paleotemperatures. *Paleoceanography*, 14(6), pp.698–705.
- Casas-Sainz, A.M. & De Vicente, G., 2009. On the tectonic origin of Iberian topography. *Tectonophysics*, 474(1-2), pp.214–235.
- CHG, 2005. Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Confideración hidrográfica del Guadalquivir: Definición del contexto hidrogeológico de humedales Andaluces. II Cádiz. Available at: <http://www.chguadalquivir.es> [Accessed May 14, 2013].
- Cohen, A.S., 2003. *Paleolimnology: The History and Evolution of Lake Systems*, Oxford University Press.
- Cohen, K.M., Finney, S. & Gibbard, P.L., 2013. International Chronostratigraphic Chart. *International Commission on Stratigraphy*.
- Comas, M.C., García-Dueñas, V. & Jurado, M.J., 1992. Neogene tectonic evolution of the Alboran Sea from MCS data. *Geo-Marine Letters*, pp.157–164.
- Crespo-Blanc, A. & Campos, J., 2001. Structure and kinematics of the South Iberian paleomargin and its relationship with the Flysch Trough units: extensional tectonics within the Gibraltar Arc fold-and-thrust belt (western Betics). *Journal of Structural Geology*, 23(10), pp.1615–1630.
- Dansgaard, W. et al., 1993. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 364(6434), pp.218–220.
- Dearing, J., 1999. *Environmental Magnetic Susceptibility- Using the Bartington MS2 System*,
- Dercourt, J. et al., 1986. Geological evolution of the tethys belt from the atlantic to the pamirs since the Lias. *Tectonophysics*, 123(1–4), pp.241–315.
- Durand-Delga, M. & Fontboté, J.M., 1980. Le cadre structural de la Méditerranée occidentale. *Mem. BRGM*, 15, pp.677–685.
- Eusterhues, K., Heinrichs, H. & Schneider, J., 2005. Geochemical response on redox fluctuations in Holocene lake sediments, Lake Steisslingen, Southern Germany. *Chemical Geology*, 222(1-2), pp.1–22.
- Fallot, P., 1948. *Les cordillères betiques*, Imprenta Elzeviriana.

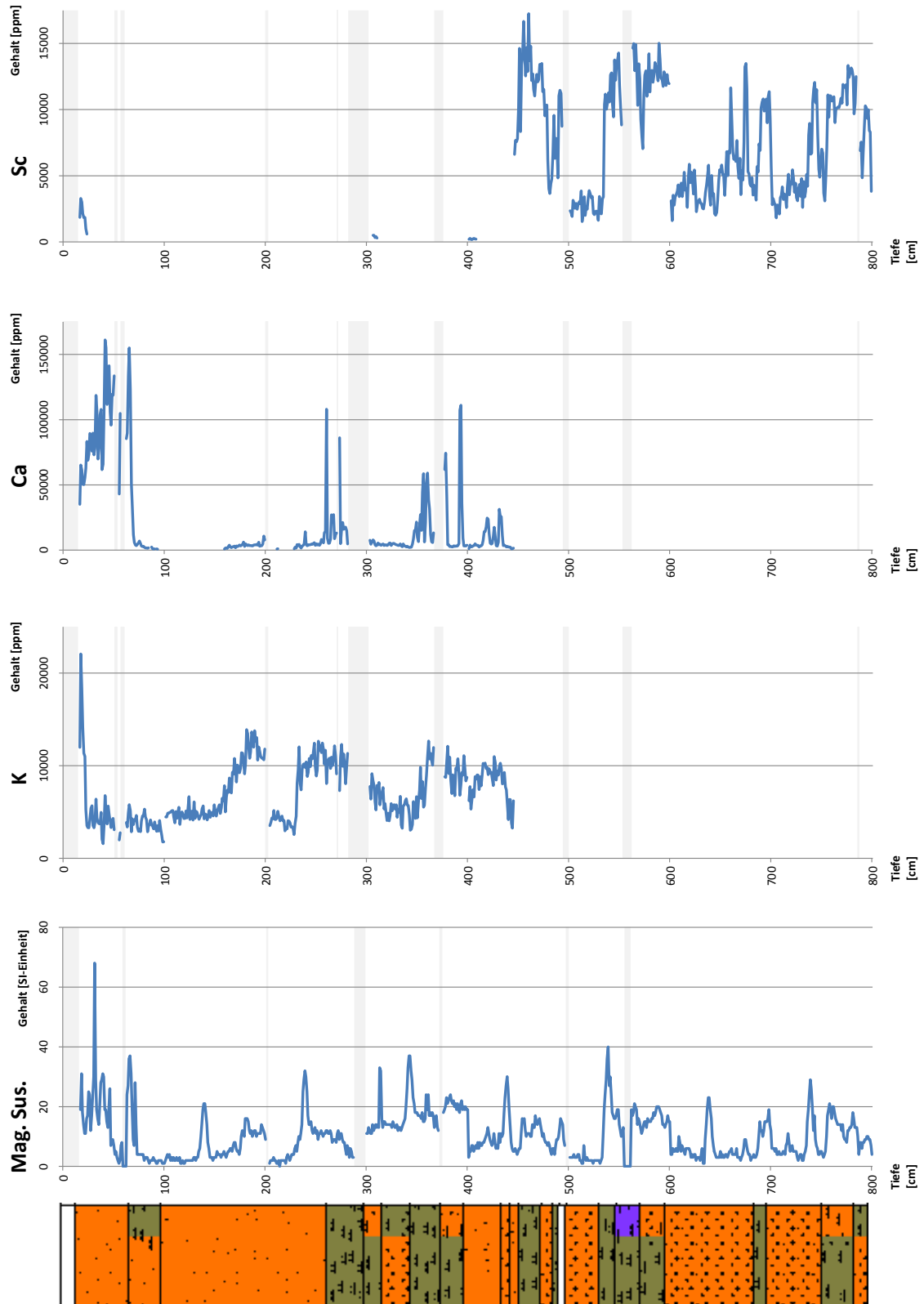
- Finlayson, C. et al., 2006. Late survival of Neanderthals at the southernmost extreme of Europe. *Nature*, 443(7113), pp.850–853.
- Friend, P.F. & Dabrio, C.J., 1996. *Tertiary basins of Spain: the stratigraphic record of crustal kinematics*, Cambridge University Press.
- García-Hernández, M. et al., 1980. Mesozoic palaeogeographic evolution of the external zones of the Betic Cordillera. *Geologie en Mijnbouw*, 59(2), pp.155–168.
- Genty, D. et al., 2003. Precise dating of Dansgaard-Oeschger climate oscillations in western Europe from stalagmite data. *Nature*, 421(6925), pp.833–7.
- Geoplaner, GPS Geoplaner. Available at: <http://gpso.de/maps/> [Accessed August 22, 2013].
- Gràcia, E. et al., 2003. Crustal architecture and tectonic evolution of the Gulf of Cadiz (SW Iberian margin) at the convergence of the Eurasian and African plates. *Tectonics*, 22(4).
- Graham, R.W., 2005. Quaternary mammal communities: relevance of the individualistic response and non-analog faunas. *Paleontological Society Papers*, 11, pp.141–158.
- Grousset, F.E. et al., 1993. Patterns of Ice-Rafted Detritus in the Glacial North Atlantic (40–55°N). *Paleoceanography*, 8(2), pp.175–192.
- Haq, B.U. & Boersma, A., 1998. *Introduction to Marine Micropaleontology*, Elsevier.
- Heinrich, H., 1988. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years. *Quaternary Research*, 29(2), pp.142–152.
- Hoernle, K. et al., 1999. Evidence for Miocene subduction beneath the Alboran Sea: ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating and geochemistry of volcanic rocks from Holes 977A and 978A. In *Proceedings of the ocean drilling program*. pp. 357–373.
- Iribarren, L. et al., 2003. Balance volumétrico de sedimentos neógenos y cuaternarios en el margen Sud- Ibérico: implicaciones tectónicas.
- Jalut, G. et al., 2000. Holocene climatic changes in the Western Mediterranean, from south-east France to south-east Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 160(3-4), pp.255–290.
- Jenkins, R., 1999. X-Ray Fluorescence Analysis. In E. Lifshin, ed. *X-ray Characterization of Materials*. Wiley-VCH, pp. 172– 208.
- Kalnicky, D.J. & Singhvi, R., 2001. Field portable XRF analysis of environmental samples. *Journal of hazardous materials*, 83(1-2), pp.93–122.
- Koinig, K.A. et al., 2003. 9000 years of geochemical evolution of lithogenic major and trace elements in the sediment of an alpine lake—the role of climate, vegetation, and land-use history. *Journal of Paleolimnology*, 30, pp.307–320.

- Kubatzki, C., 2000. Wechselwirkungen zwischen Klima und Landoberfläche im Holozän - Modellstudien -. *Fachbereich Geowissenschaften*.
- Kukla, G. et al., 1988. Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility. *Geology*, 16(9), pp.811–814.
- Lonergan, L. & White, N., 1997. Origin of the Betic-Rif mountain belt. *Tectonics*, 16(3), pp.504–522.
- Maher, B.A. & Thompson, R., 1995. Paleorainfall Reconstructions from Pedogenic Magnetic Susceptibility Variations in the Chinese Loess and Paleosols. *Quaternary Research*, 44(3), pp.383–391.
- Mann, M.E., 2002. The value of multiple proxies. *Science*, 297, pp.1481–1482.
- Markl, G., 2008. *Minerale und Gesteine, Mineralogie- Petrologie- Geochemie 2. Auflage.*, Spektrum.
- Martín-Puertas, C. et al., 2009. Geochemical processes in a Mediterranean Lake: a high-resolution study of the last 4,000 years in Zoñar Lake, southern Spain. *Journal of Paleolimnology*, 46(3), pp.405–421.
- Martín-Puertas, C. et al., 2010. Late Holocene climate variability in the southwestern Mediterranean region: an integrated marine and terrestrial geochemical approach. *Climate of the past*, 6, pp.807–816.
- Morellón, M. et al., 2009. Lateglacial and Holocene palaeohydrology in the western Mediterranean region: The Lake Estanya record (NE Spain). *Quaternary Science Reviews*, 28(25-26), pp.2582–2599.
- Moreno, A. et al., 2005. Links between marine and atmospheric processes oscillating on a millennial time-scale. A multi-proxy study of the last 50,000yr from the Alboran Sea (Western Mediterranean Sea). *Quaternary Science Reviews*, 24(14-15), pp.1623–1636.
- Piorek, S., 1994. Principles and applications of man-portable X-ray fluorescence spectrometry. *Trends in analytical geochemistry*, 13(7), pp.281–286.
- Platt, J.P. & Vissers, R.L.M., 1989. Extensional collapse of thickened continental lithosphere: A working hypothesis for the Alboran Sea and Gibraltar arc. *Geology*, 17(6), pp.540–543.
- Rasmussen, T.L. et al., 1996. Rapid changes in surface and deep water conditions at the Faeroe Margin during the last 58,000 years. *Paleoceanography*, 11(6), pp.757–771.
- Reed, J.M., 1996. The potential of diatoms and other palaeolimnological indicators for Holocene palaeoclimate reconstruction from Spanish salt lakes : with special reference to the Laguna de Medina (Cadiz, southwest Spain).
- Rehault, J.-P., Boillot, G. & Mauffret, A., 1984. The Western Mediterranean Basin geological evolution. *Marine Geology*, 55(3-4), pp.447–477.

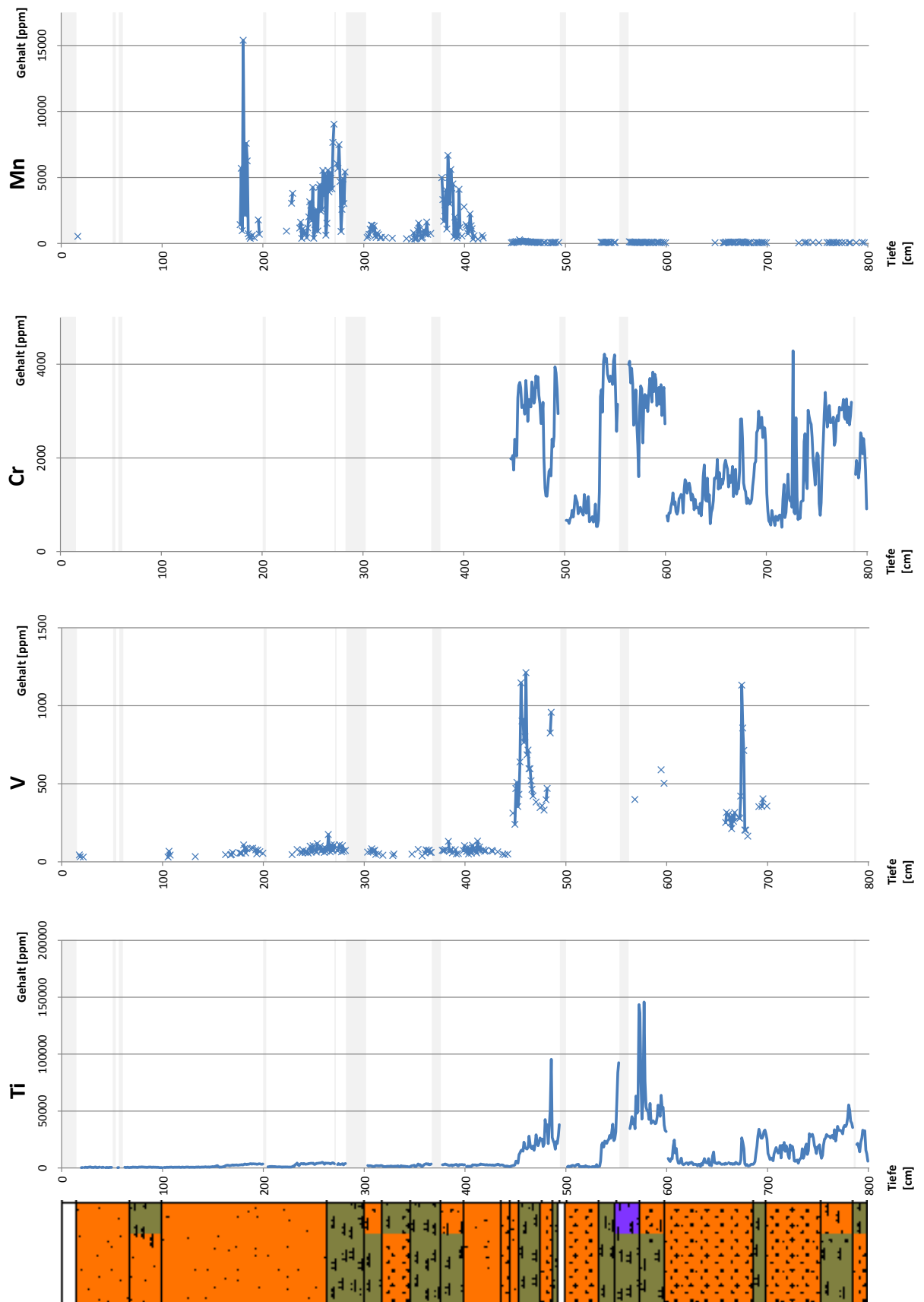
- Reicherter, K., 2001. Neotektonik und Paläoseismologie im nördlichen Gibraltarbogen. Unpubl. Habilitationsschrift, Univ. Hamburg. *Noch nicht erschienen*, p.224.
- Rodríguez-Fernández, J., de Galdeano, C.S. & Fernández, J., 1989. Genesis and evolution of the Granada Basin (Betic Cordillera, Spain). *Intermontane Basins. Geology and Resources, Thauasuthipitak TP, Ounchanum P (eds). University of Chiang Mai, Thailand*, pp.294–305.
- Rodríguez-Rodríguez, M., 2007. Hydrogeology of ponds, pools, and playa-lakes of southern Spain. *Wetlands*, 27(4), pp.819–830.
- Sanz De Galdeano, C., 1990. Geologic evolution of the Betic Cordilleras in the Western Mediterranean, Miocene to the present. *Tectonophysics*, 172(1-2), pp.107–119.
- Sanz de Galdeano, C. & Vera, J.A., 1992. Stratigraphic record and palaeogeographical context of the Neogene basins in the Betic Cordillera, Spain. *Basin Research*, 4(1), pp.21–36.
- Sanz de Galdeano, C.M., 1996. Tertiary tectonic framework of the Iberian Peninsula. *Tertiary Basins of Spain: the Stratigraphic Record of Crustal Kinematics*, 6, p.9.
- Sarnthein, M. et al., 2001. Fundamental modes and abrupt changes in North Atlantic circulation and climate over the last 60 ky: concepts, reconstruction and numerical modeling.
- Schmidt-Wygasch, C. et al., 2010. Indirect dating of historical land use through mining: Linking heavy metal analyses of fluvial deposits to archaeobotanical data and written accounts. *Geoarchaeology*, 25(6), pp.837–856.
- SFB-806, 2013. SFB 806. Available at: <http://www.sfb806.uni-koeln.de/> [Accessed June 24, 2013].
- Srivastava, S.P. et al., 1990. Motion of Iberia since the Late Jurassic: results from detailed aeromagnetic measurements in the Newfoundland Basin. *Tectonophysics*, 184(3), pp.229–260.
- Stoner, J.S. et al., 2000. Geomagnetic paleointensity and environmental record from Labrador Sea core MD95-2024: global marine sediment and ice core chronostratigraphy for the last 110 kyr. *Earth and Planetary Science Letters*, 183(1-2), pp.161–177.
- Vergés, J. & Fernández, M., 2006. Ranges and basins in the Iberian Peninsula: their contribution to the present topography. *Memoirs-Geological Society of London*, pp.223–234.
- Viseras, C. et al., 2005. The Neogene-Quaternary basins of the Betic Cordillera: an overview. In *Geophysical Research Abstracts*. pp. 11123–11127.
- Vissers, R.L.M., Platt, J.P. & van der Wal, D., 1995. Late orogenic extension of the Betic Cordillera and the Alboran Domain: A lithospheric view. *Tectonics*, 14(4), pp.786–803.

- Voelker, A., 1999. *Zur Deutung der Dansgaard-Oeschger Ereignisse in ultra-hochauflösenden Sedimentprofilen aus dem Europäischen Nordmeer*. Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität.
- Weniger, G.-C. & Reicherter, K., SFB 806: Cluster C. Available at: <http://www.sfb806.uni-koeln.de/> [Accessed June 28, 2013].
- Woldstedt, P., 1962. Über die Gliederung des Quartärs und Pleistozäns. , 13(1).
- Wolff, E.W. et al., 2010. Millennial-scale variability during the last glacial: The ice core record. *Quaternary Science Reviews*, 29(21-22), pp.2828–2838.
- Ziegler, P.A., 1988. Evolution of the Arctic-North Atlantic and the Western Tethys- A visual Presentation of a Series of paleogeographic-paleotectonic maps. *Mem.-Am. Assoc. Pet. Geol*, 43, pp.164–196.
- Ziegler, P.A., 1990. *Geological Atlas of Western and Central Europe: 1990*, Geological Society.

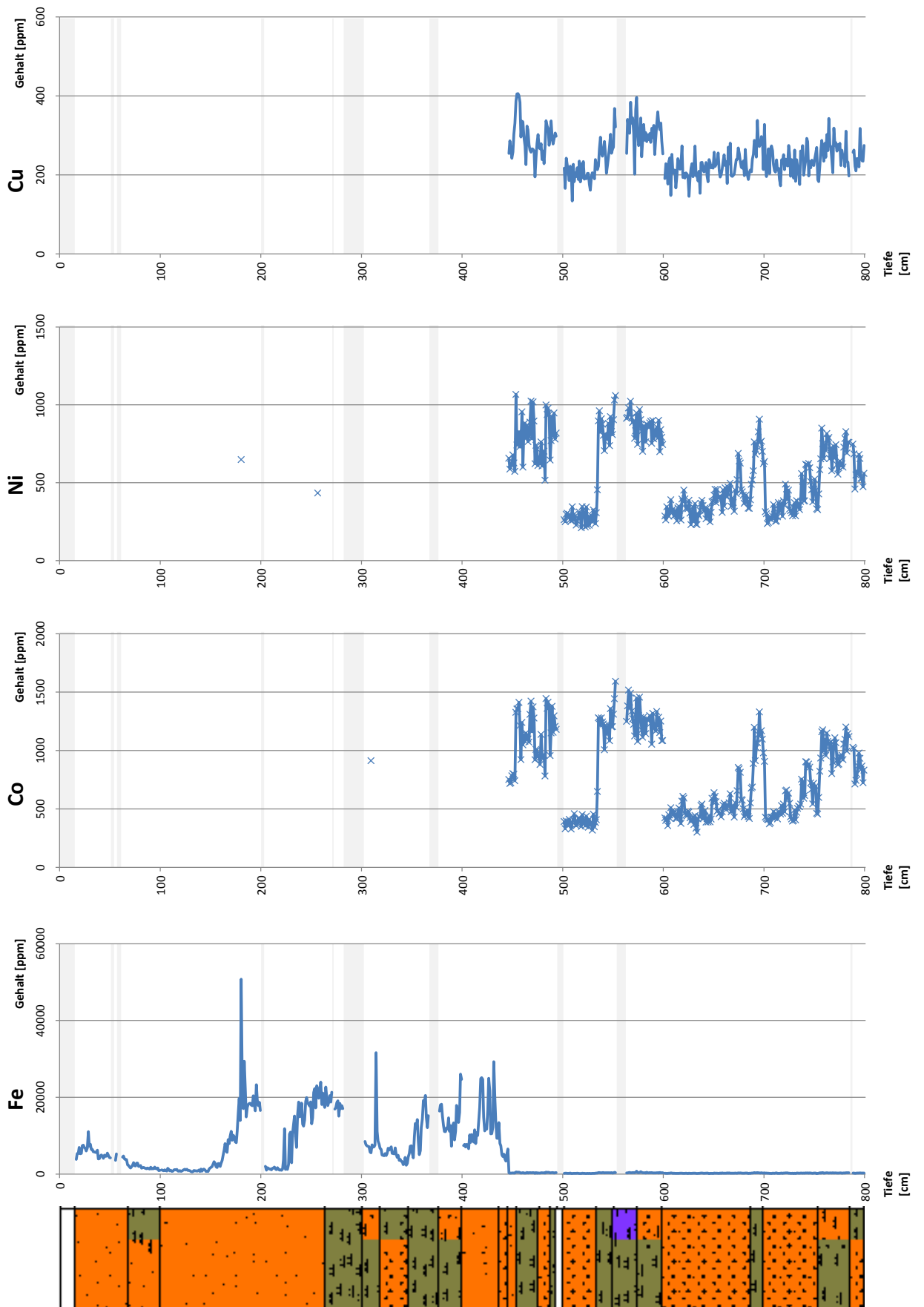
Anhang



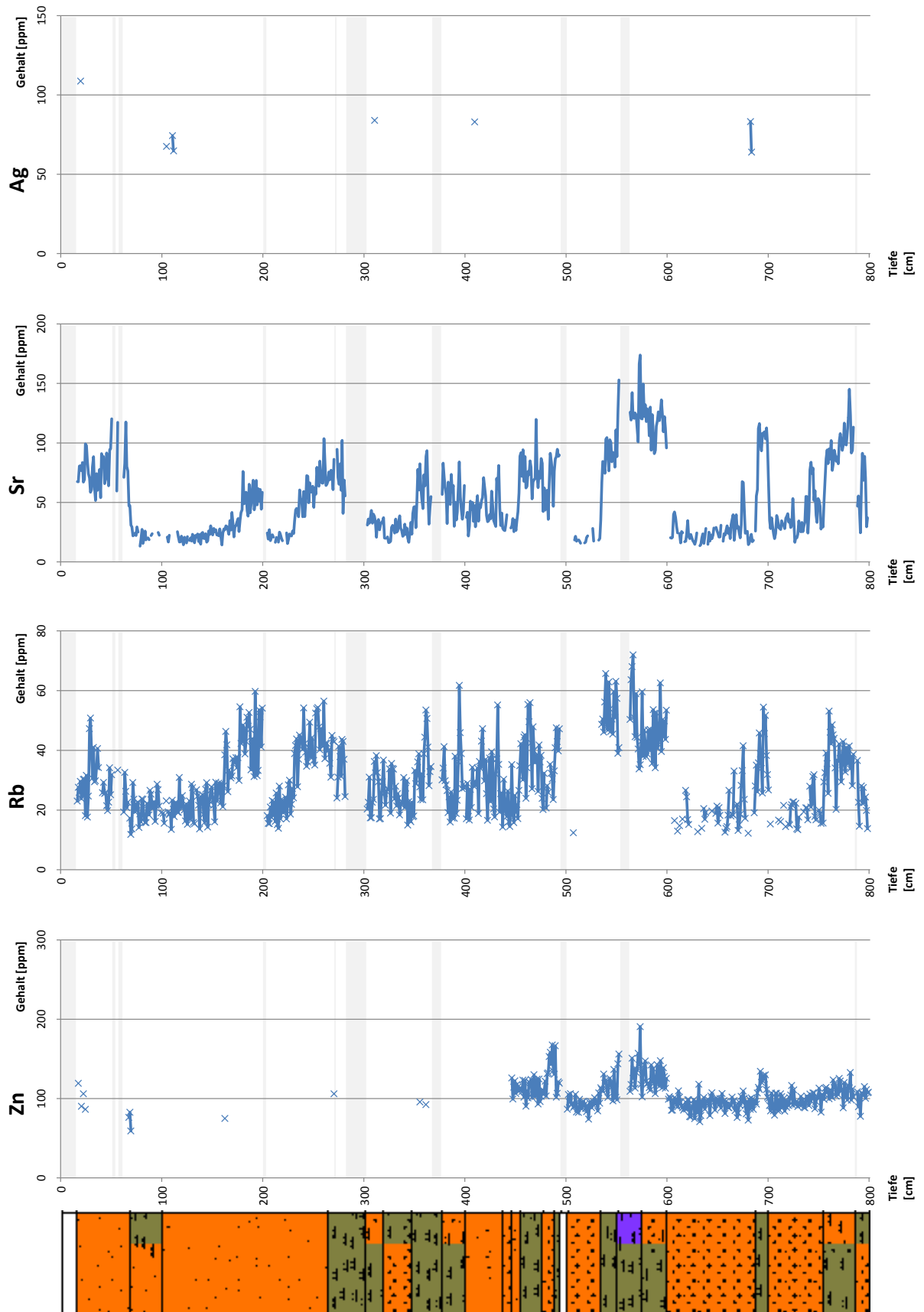
1: Messergebnisse der magnetischen Suszeptibilität (Mag. Sus.) und von Kalium (K), Calcium (Ca) und Scandium (Sc) der Bohrung La Paja1 mit Bohrprofil. Messlücken sind durch graue Balken dargestellt, Legende zum Bohrprofil in Abb. 11.



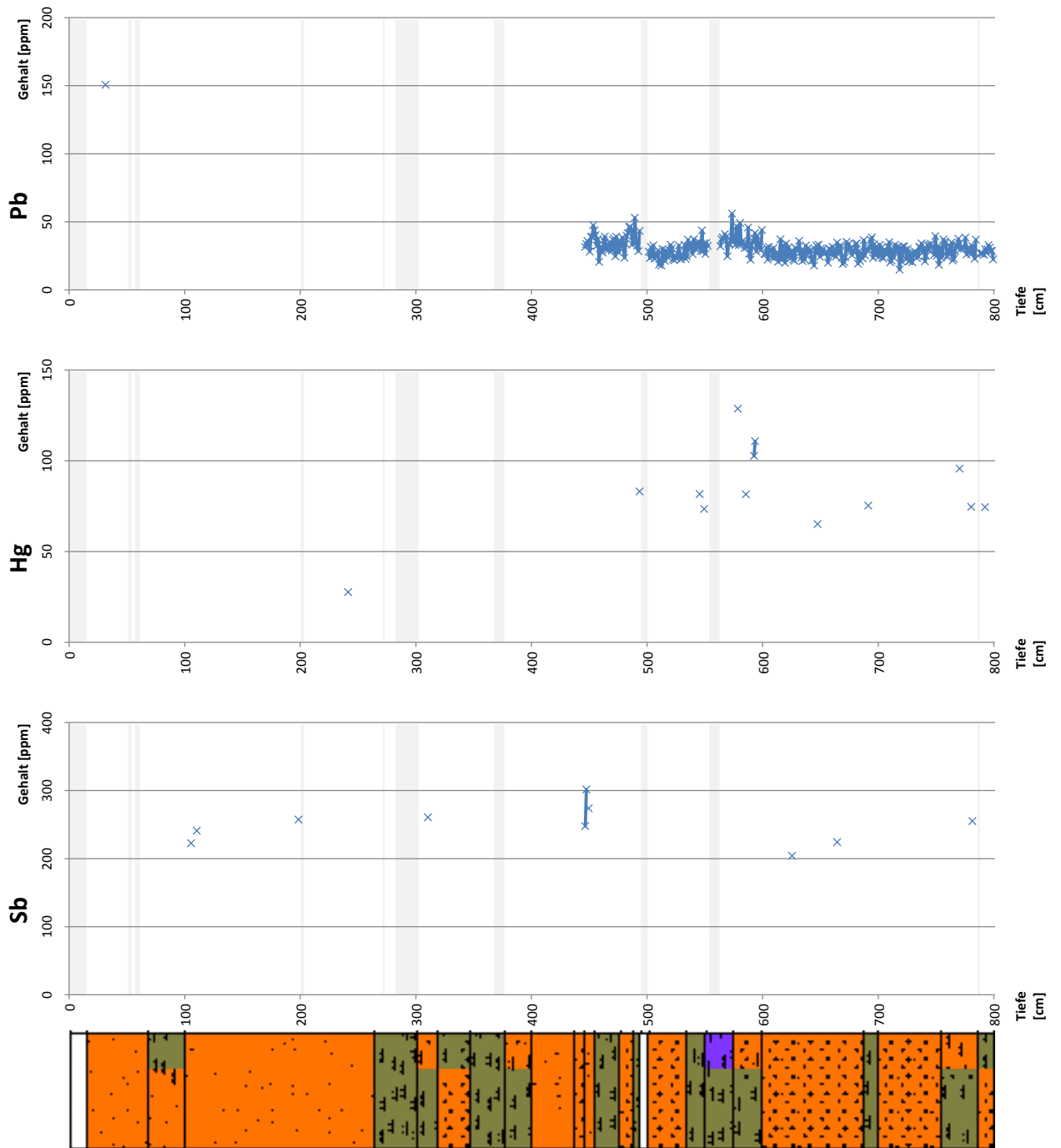
2: Messergebnisse von Titan (Ti), Vanadium (V), Chrom (Cr) und Mangan (Mn) der Bohrung La Paja1 mit Bohrprofil. Messlücken sind durch graue Balken dargestellt, Legende zum Bohrprofil in Abb. 11.



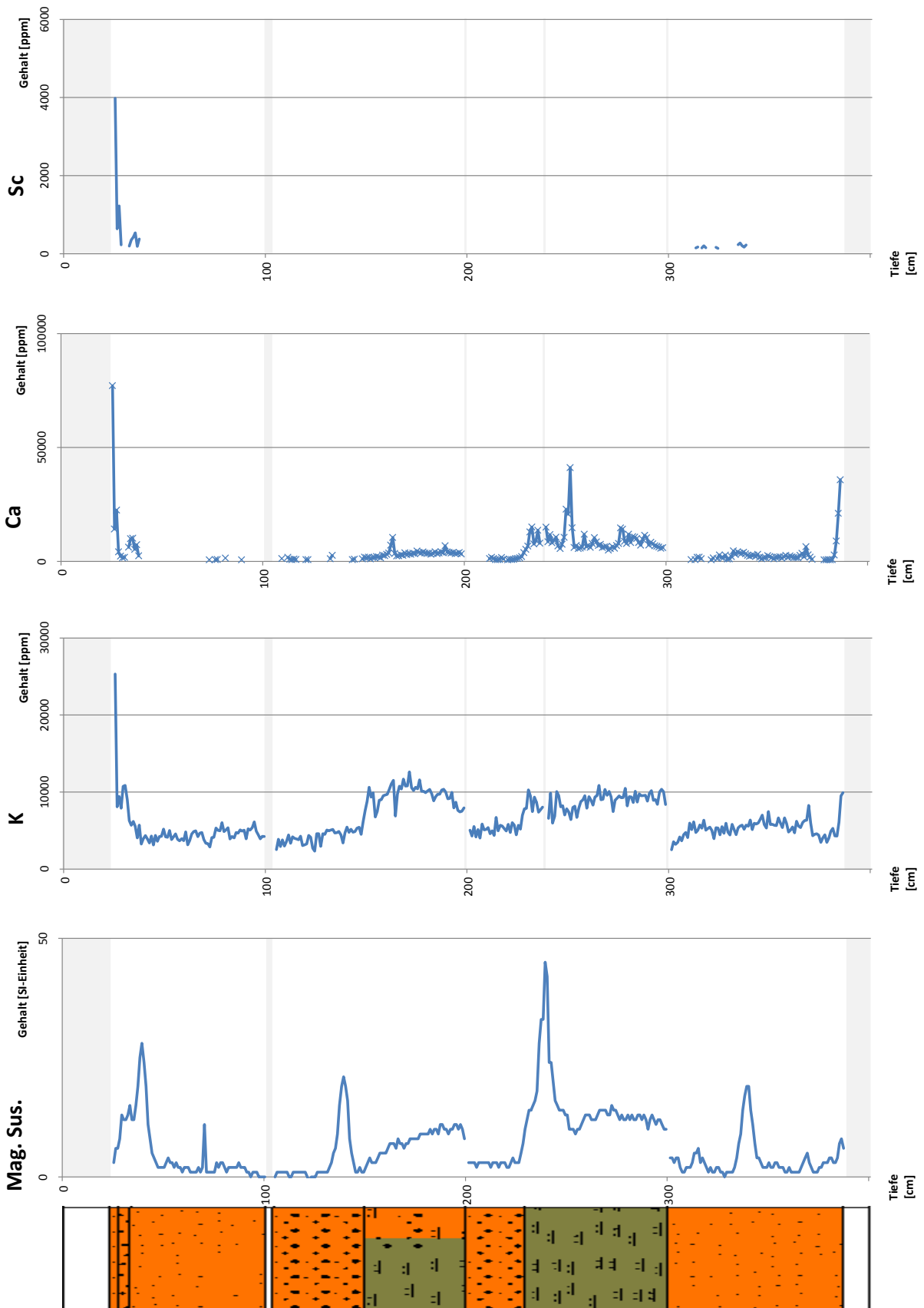
3: Messergebnisse von Eisen (Fe), Cobalt (Co), Nickel (Ni) und Kupfer (Cu) der Bohrung La Paja1 mit Bohrprofil. Messlücken sind durch graue Balken dargestellt, Legende zum Bohrprofil in Abb. 11.



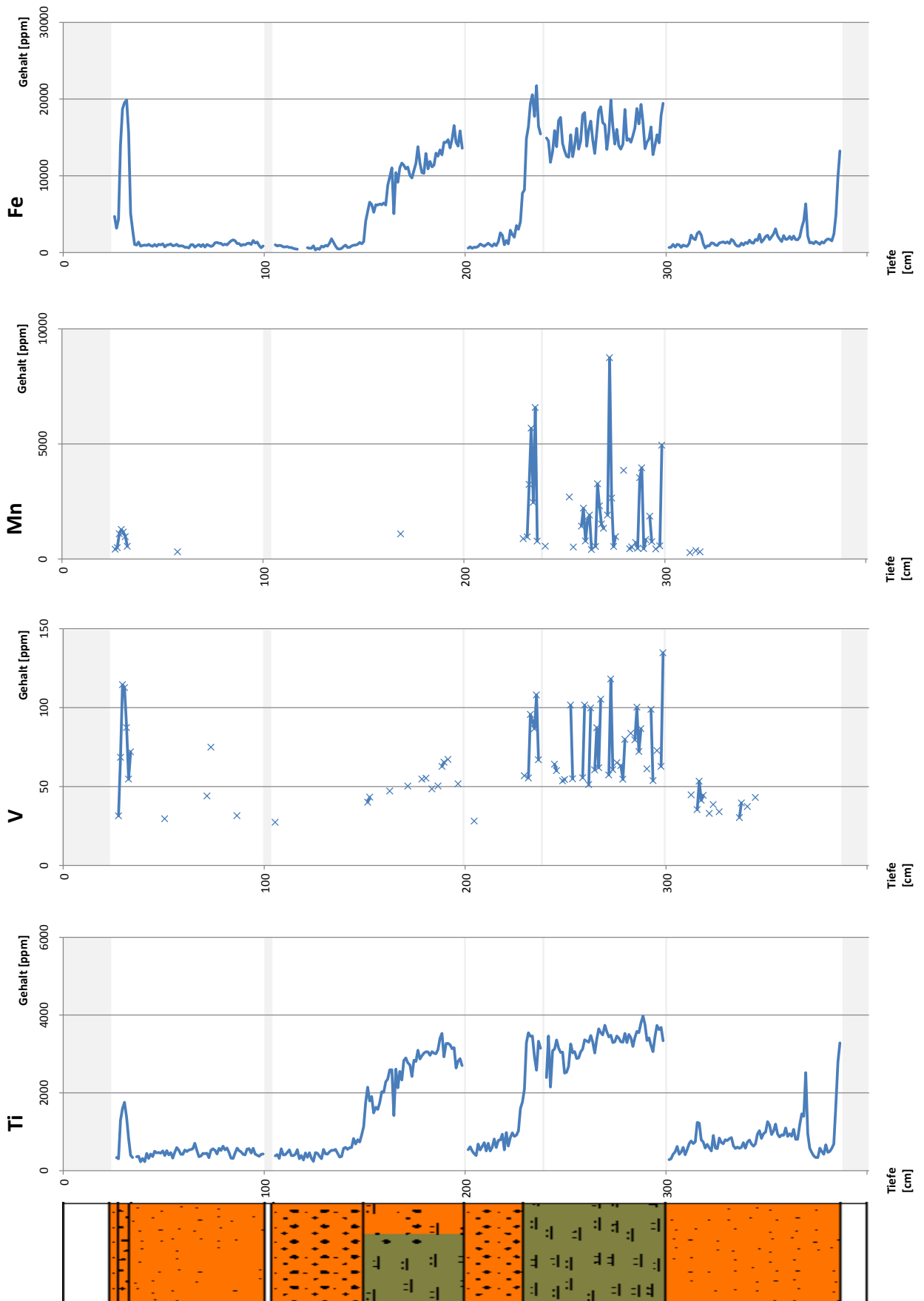
4: Messergebnisse von Zink (Zn), Rubidium (Rb), Strontium (Sr) und Silber (Ag) der Bohrung La Paja1 mit Bohrprofil. Messlücken sind durch graue Balken dargestellt, Legende zum Bohrprofil in Abb. 11.



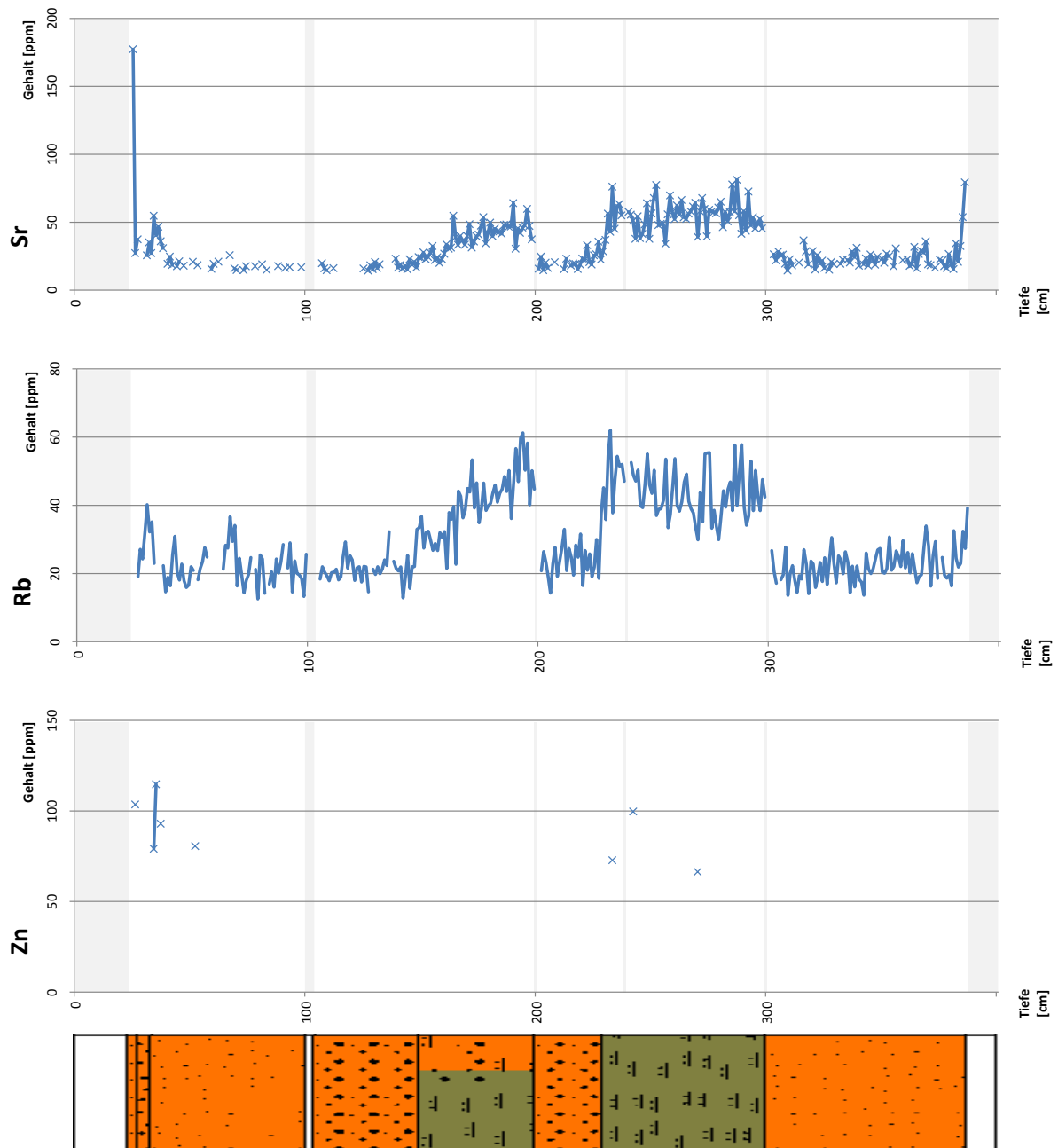
5: Messergebnisse von Antimon (Sb), Quecksilber (Hg) und Blei (Pb) der Bohrung La Paja1 mit Bohrprofil. Messlücken sind durch graue Balken dargestellt, Legende zum Bohrprofil in Abb. 11.



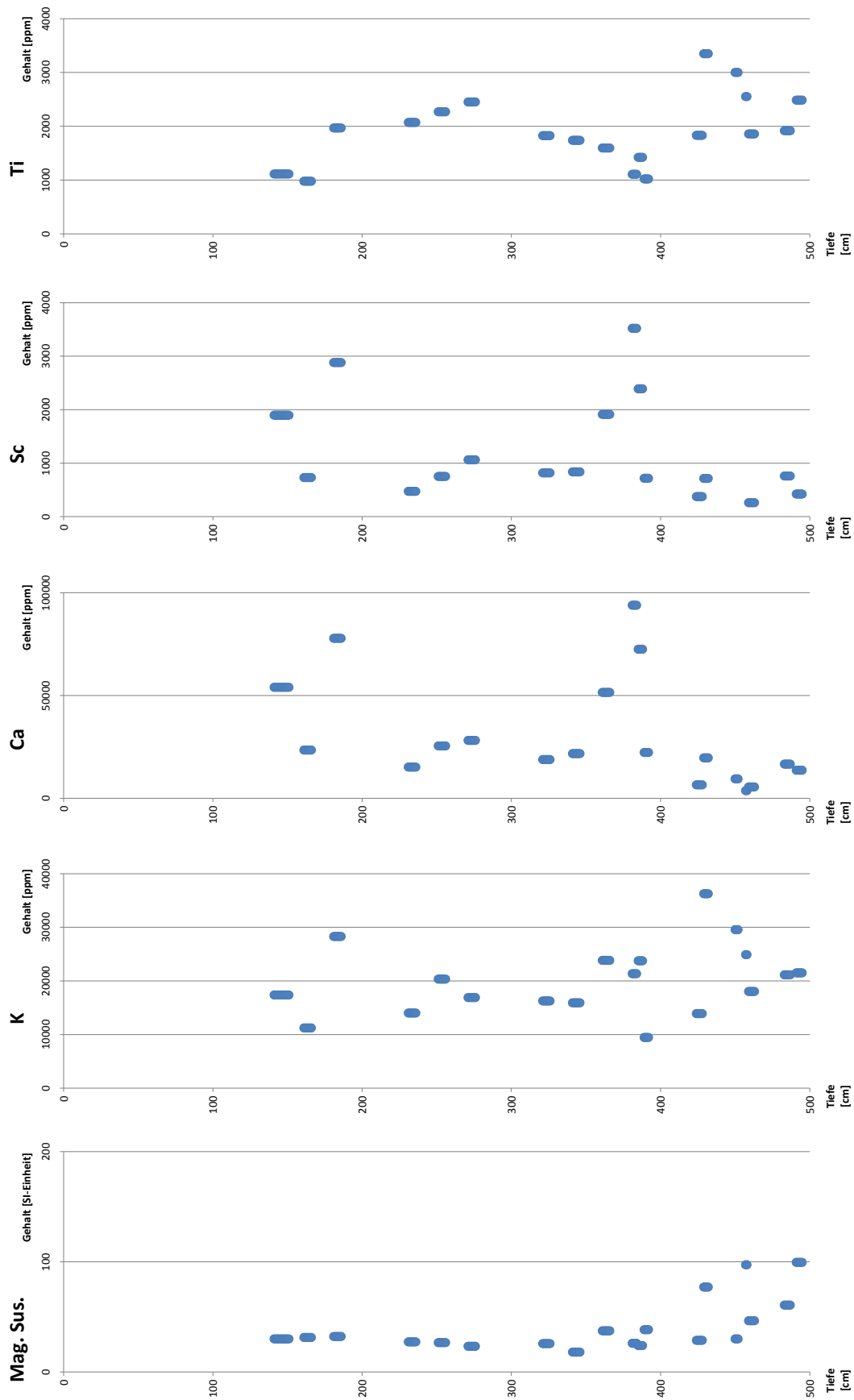
6: Messergebnisse der magnetischen Suszeptibilität (Mag. Sus.) und von Kalium (K), Calcium (Ca) und Scandium (Sc) der Bohrung La Paja2 mit Bohrprofil. Messlücken sind durch graue Balken dargestellt, Legende zum Bohrprofil in Abb. 11.



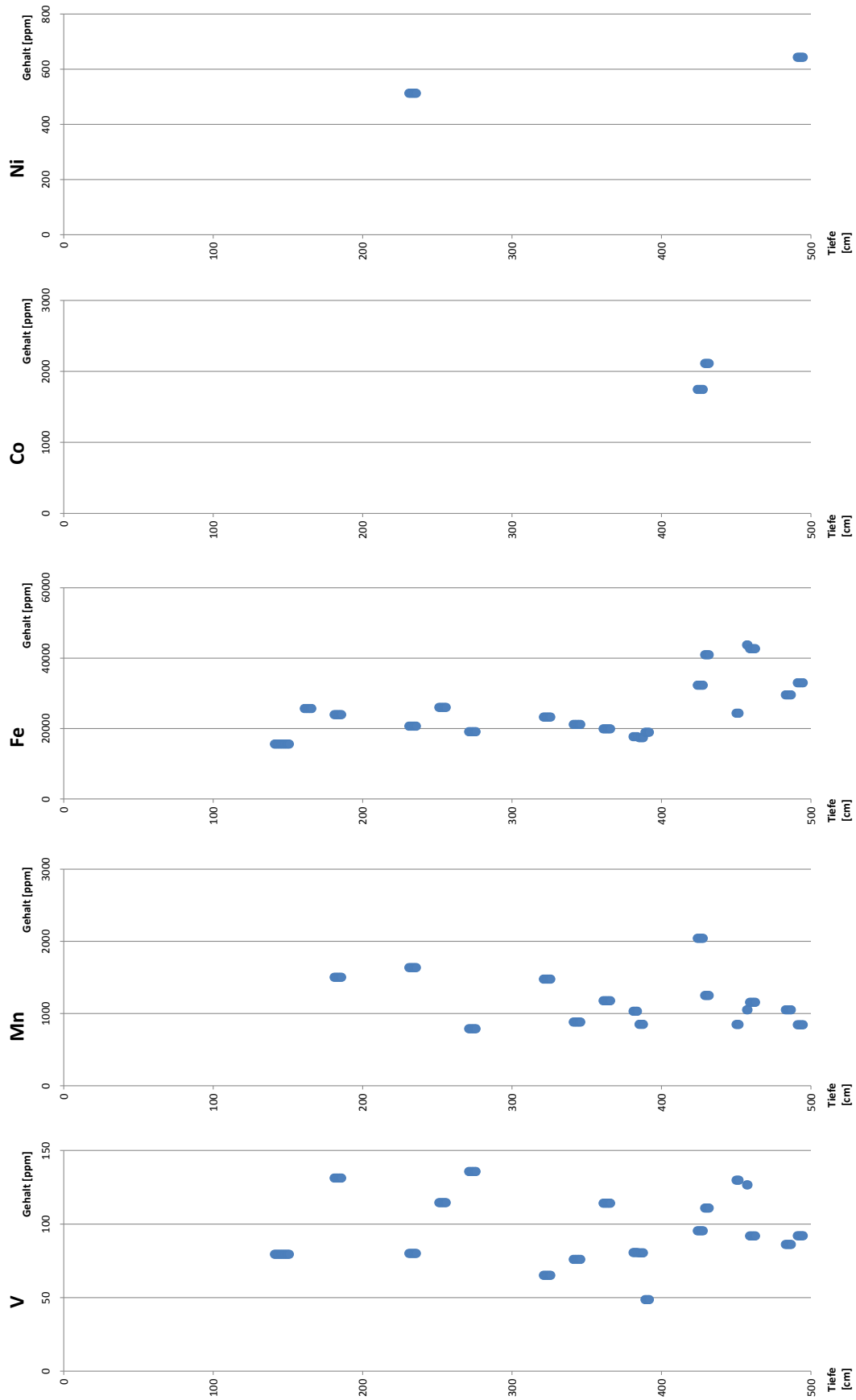
7: Messergebnisse von Titan (Ti), Vanadium (V), Mangan (Mn) und Eisen (Fe) der Bohrung La Paja2 mit Bohrprofil. Messlücken sind durch graue Balken dargestellt, Legende zum Bohrprofil in Abb. 11.



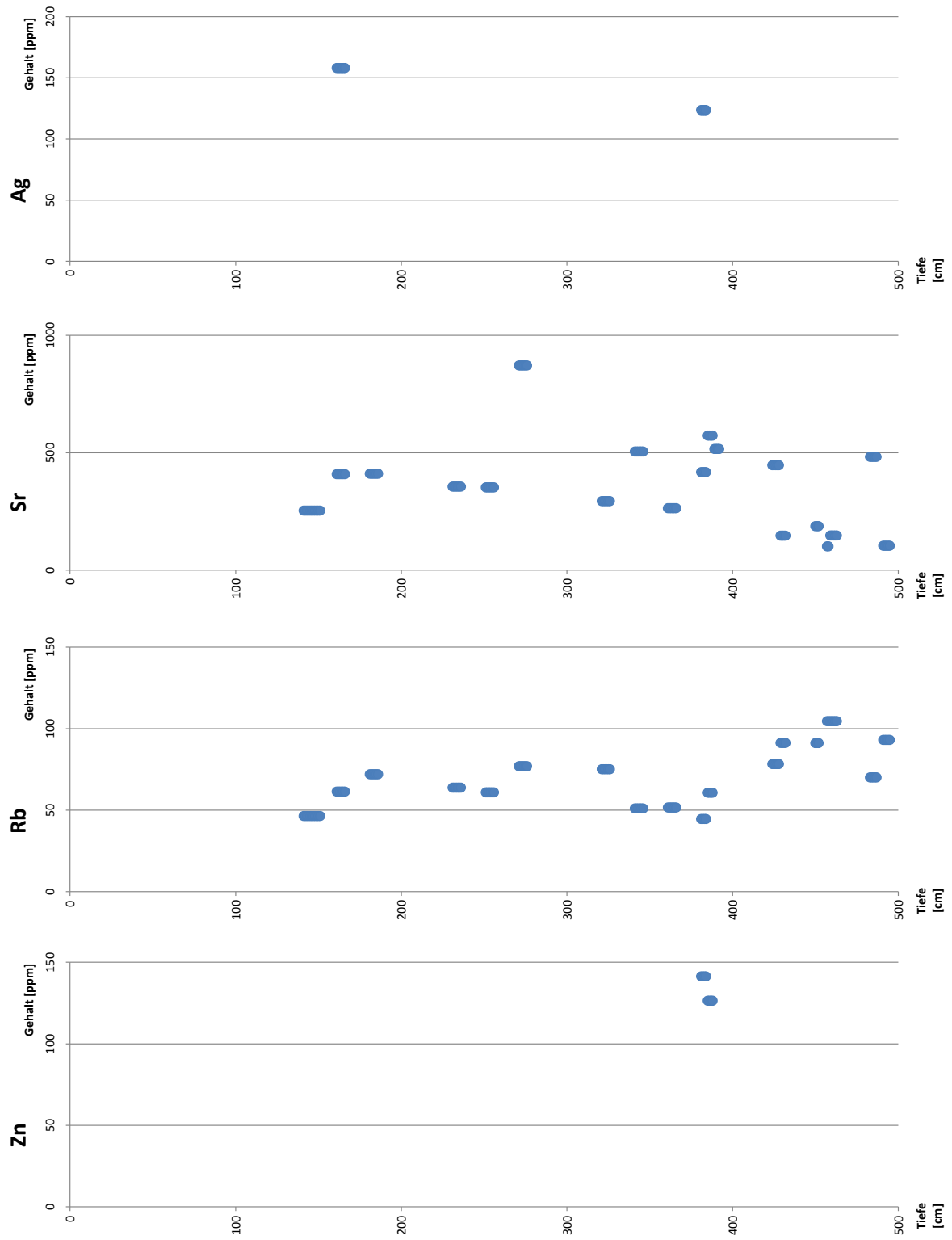
8: Messergebnisse von Zink (Zn), Rubidium (Rb) und Strontium (Sr) der Bohrung La Paja2 mit Bohrprofil. Messlücken sind durch graue Balken dargestellt, Legende zum Bohrprofil in Abb. 11.



9: Messergebnisse der magnetischen Suszeptibilität (Mag. Sus.) und von Kalium (K), Calcium (Ca), Scandium (Sc) und Titan (Ti) der Bohrung Hondilla.



10: Messergebnisse von Vanadium (V), Mangan (Mn), Eisen (Fe), Cobalt (Co) und Nickel (Ni) der Bohrung Hondilla.



11: Messergebnisse von Zink (Zn), Rubidium (Rb), Strontium (Sr) und Silber (Ag) der Bohrung Hondilla.