

***Magnetometerprospektion und magnetische Eigenschaften von  
braunen Plaggeneschen (Oberesch; Lechtinger Esch) und von  
semiterrestrischen Sedimenten (Fossa Carolina).***

**Dissertation**

**zur Erlangung des Grades**

**Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)**

**am Fachbereich Kultur- und Sozialwissenschaften**

**der Universität Osnabrück**

**vorgelegt am 13.03.2017**

**von**

**Andreas Stele**

## Zusammenfassung

Die Magnetometerprospektion gilt mittlerweile als ein Standardverfahren der archäologischen Prospektion. Nicht selten jedoch werden Messergebnisse (Magnetogramme) dieser schnellen und oft ertragreichen Prospektionsmethode ohne eine notwendige Überprüfung im Labor interpretiert, was zu falschen Bewertungen der Magnetfeldanomalien in archäologischen und geoarchäologischen Kontexten führen kann. Die vorliegende Arbeit versucht diesem Problem entgegen zu treten und widmet sich dem Ziel Interpretationen von Magnetometermessungen zu verbessern und Verfahren weiter zu entwickeln, die zur schnellen und hinreichenden Klärung von Magnetfeldanomalien angewandt werden können. Hierfür werden in mehreren Untersuchungsgebieten magnetometrische und umweltmagnetische Messungen in Kombination mit bodenkundlich-sedimentologischen Kennwerten, ausgewertet.

Als Untersuchungsgebiete und Umweltarchive stehen die braunen Plaggenesche am Übergang zwischen dem Unteren Weserbergland und der Dümmer-Geestniederung sowie die semiterrestrischen Sedimente des Karlsgrabens (Fossa Carolina) am Übergang zwischen dem fränkischen Keuper-Lias-Land und der fränkischen Alb im Fokus.

Magnetometrisch prospektiert wird mit einem, sehr oft bei archäologischen Prospektionen eingesetzten, Vektor-Gradiometer (Bartington Grad601 dual). Als geophysikalische Leitgröße zur Identifizierung und ersten Charakterisierung magnetisch-auffälliger und Magnetfeldanomalien-erzeugender Bodenhorizonte und Sedimentschichten in betrachteten Umweltarchiven wird die magnetische Suszeptibilität herangezogen. Anhand der Curie-Temperatur-Messungen und Domänenstatusermittlungen werden die umweltmagnetischen Minerale und deren Korngrößen in magnetisch auffälligen Lagen und Horizonten charakterisiert.

Ergebnisse aus der Kombination umweltmagnetischer Messungen mit Bodenkennwerten an braunen Plaggeneschen weisen darauf hin, dass die in den Plaggenauflagen detektierten, ferrimagnetischen Eisensulfide PSD-Greigite anthropogen induziert sein müssen. Außerdem deutet sich an, dass diese Greigite vom Sicker- und Grundwasser verändert und gegebenenfalls mobilisiert werden können. Ein Vergleich mit Greigiten aus der Literatur zeigt, dass die Plaggenesch-PSD-Greigite in einem Domänenstatus vorliegen, in dem bislang noch keine natürlichen Greigite gemessen wurden. Dieser Domänenstatus wird als ein Oxidationsstadium des ferrimagnetischen Eisensulfids zur Diskussion gestellt.

In den Grabenverfüllungen bzw. Paläokanälen des Karlsgrabens wurden in Magnetfeldanomalien-erzeugenden Lagen authigene SD-Greigite nachgewiesen und damit die Annahme von Stanjek et al. (1994) bestätigt, dass die Greigite für die Magnetometerprospektion in semiterrestrischen Umgebungen von Bedeutung sein können. In flankierende Begleitstrukturen des Karlsgrabens wurden hingegen

hocherhitzte, thermoremanente PSD-Titanomagnetite als Magnetfeldanomalien-Erzeuger ermittelt. Ihre Entstehung bleibt ungeklärt, jedoch wird eine natürliche Bildung dieser Magnetminerale vor Ort ausgeschlossen.

Im Hinblick auf das Ziel der vorliegenden Arbeit hat sich die methodische Vorgehensweise am Karlsgraben als besonders effiziente und relativ kostengünstige Methode zur abgesicherten Klärung von Magnetfeldanomalien in den Magnetogrammen gezeigt.

## Abstract

Magnetometer prospecting is now considered a standard method of archaeological prospecting. Not seldom, however, the measurement results (magnetograms) of this quick and often efficient prospecting method are interpreted without required validation in the lab, which may lead to incorrect assessments of the magnetic field anomalies in archaeological and geoarchaeological contexts. This study seeks to address this problem and is dedicated to the aim of improving upon interpretations of magnetometer measurements and further developing processes that can be applied towards rapid and sufficient clarification of magnetic field anomalies. For this purpose, magnetometric and environmental magnetic measurements, combined with pedological and sedimentological parameters, are evaluated in several survey areas.

The survey areas and environmental archives in focus are the brown plaggen soils at the transition between the lower Weser Uplands and the Dümmer Geest Lowland, as well as the semi-terrestrial sediments of the Fossa Carolina at the transition between the Franconian Swabian Keuper-Lias Plains and the Franconian Jura.

The magnetometric prospecting is conducted using a vector gradiometer (Bartington Grad601 dual), deployed frequently on archaeological prospecting missions. Magnetic susceptibility is used as a geophysical indicator for the identification and initial characterization of magnetically conspicuous and magnetic field anomaly generating soil horizons and sedimentological layers reviewed in environmental archives. Based on the Curie temperature measurements and magnetic domain investigations, the environmental magnetic minerals and their particle sizes are characterized in magnetically conspicuous layers and horizons.

Findings from the combination of environmental magnetic measurements with soil characteristics of brown plaggen soils indicate that the ferrimagnetic PSD iron sulfide greigite detected in the plaggen layers must have been induced anthropogenically. Furthermore, there are indications that these greigites may have been modified and in some cases mobilized by seepage and groundwater. A comparison with greigites from literature shows that the plaggen soil PSD greigites are found in a magnetic domain in which no natural greigites have been previously measured. This magnetic state is put forth for discussion as an oxidation stage of the ferrimagnetic iron sulfide.

In the trench fills or paleochannels of the Fossa Carolina, authigenic SD greigites were discovered in layers exhibiting magnetic field anomalies, thus confirming the supposition by Stanjek et al. (1994) that greigites can be of significance for magnetometer prospecting in semi-terrestrial environments. By contrast, highly-heated, thermoremanent PSD titanomagnetites, causing magnetic field anomalies,

were discovered in flanking accompanying structures of the Fossa Carolina. Their origin remains unresolved, yet a natural formation of these magnetic minerals on site is ruled out.

Considering the objective of this research, the methodical approach at the Fossa Carolina proved to be an especially efficient and relatively economical method for verified clarification of magnetic field anomalies in the magnetograms.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>I</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>XI</b>
<b>Abkürzungen.....</b>	<b>XII</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Forschungsziel und Relevanz der Arbeit.....	1
1.2 Verortung der Arbeit in der Wissenschaftslandschaft .....	2
1.3 Zum Aufbau der Arbeit .....	3
1.4 Stand der Forschung und Fragestellung.....	3
1.4.1 Umweltmagnetik: ein allgemeiner Überblick.....	3
1.4.2 Magnetometerprospektion und Umweltmagnetik in der Archäologie .....	5
1.4.3 Problem- und Fragestellung .....	8
<b>2 Grundlagen und Methoden .....</b>	<b>10</b>
2.1 Grundlagen und Methoden der Umweltmagnetik .....	10
2.1.1 Messungen in uniformen und variablen Magnetfeldern .....	10
2.1.1.1 Volumenssuszeptibilität (VS).....	12
2.1.1.2 Massenspezifische (MS) und frequenzabhängige Suszeptibilität (FMS).....	15
2.1.1.3 Domänenstatusermittlung aus Hysterese- und Koerzitivkraftmessungen .....	18
2.1.2 Ermittlung magnetischer Minerale aus thermomagnetischen Messungen.....	22
2.1.3 Zusammenschau umweltmagnetischer Methoden im Hinblick auf den Nachweis .....	
magnetischer Remanenzträger in Umweltarchiven .....	22
2.2 Grundlagen und Methode der Magnetometerprospektion .....	25
2.2.1 Eingesetzter Magnetometer und messtechnischer Hintergrund.....	25
2.2.2 Verarbeitung von Magnetometerdaten.....	27
2.2.3 Interpretation von Magnetogrammen .....	28

2.3 Qualitätssicherung umweltmagnetischer und magnetometrischer Messungen.....	29
2.4 Aufschlussarten, Geländemessungen, Ansprache und Beprobung.....	31
2.5 Ermittlung bodenkundlich-sedimentologischer Kennwerte im Labor.....	32
2.5.1 Glühverlust (LOI).....	32
2.5.2 Korngrößenanalysen.....	33
2.5.3 pH-Wert.....	33
2.5.4 Phosphor- und Eisenanalytik.....	33
2.6 Fernerkundliche Methoden und GIS.....	33
<b>3 Untersuchungsgebiete und Umweltarchive.....</b>	<b>35</b>
3.1 Lage der Untersuchungsgebiete innerhalb von Großregionen.....	35
3.2 Untersuchungsgebiet Oberesch und Vergleichsstandort Lechtinger Esch.....	37
3.2.1 Naturraum und physische Geographie.....	37
3.2.2 Entstehung, Eigenschaften und Bedeutung der Plaggenesche.....	41
3.3 Untersuchungsgebiet Karlsgraben (Fossa Carolina).....	45
3.3.1 Lage und geoarchäologischer Hintergrund des Karlsgrabens.....	45
3.3.2 Naturraum und physische Geographie des Karlsgrabens.....	46
<b>4 Ergebnisse und Diskussion.....</b>	<b>50</b>
4.1 Magnetometerprospektion am Oberesch.....	50
4.2 Umweltmagnetische Untersuchungen an braunen Plaggeneschen.....	53
4.2.1 VS und Ansprache der braunen Plaggenesche.....	53
4.2.2 MS, FMS und andere Laborkennwerte der braunen Plaggenesche.....	60
4.2.3 Magnetominerale der Plaggenauflagen und ihre Domänenstruktur.....	65
4.3 Zur Herkunft und Dynamik der Magnetominerale in braunen Plaggeneschen.....	69
4.4 Magnetometerprospektionen am Karlsgraben.....	74
4.5 Umweltmagnetische Untersuchungen am Karlsgraben.....	76
4.5.1 VS der Sedimentkerne vom Karlsgraben.....	76
4.5.2 Umweltmagnetische Eigenschaften der Störkörper-Proben vom Karlsgraben.....	79
4.6 Entstehung von Magnetfeldanomalien am Karlsgraben.....	85
4.6.1 Herkunft ferrimagnetischer Eisenoxid-Störkörper.....	85

4.6.2 Entstehung ferrimagnetischer Eisensulfid-Störkörper .....	87
<b>5 Schlussfolgerungen und Perspektiven .....</b>	<b>92</b>
5.1 Schlussfolgerungen und Beantwortung der Fragestellungen .....	92
5.2 Perspektiven .....	95
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>98</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>117</b>
Inhalt des Anhangs .....	117
<b>Erklärung über die Eigenständigkeit der erbrachten wissenschaftlichen Leistung .....</b>	<b>123</b>



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Fundamentale magnetische Ordnungen innerhalb eines uniformen Magnetfeldes. ....	10
Abbildung 2.2: Ausgewählte Möglichkeiten der Anordnung von austausch-gekoppelter Spin-Strukturen in Materialien mit unterschiedlichem ferromagnetischen Verhalten. ....	12
Abbildung 2.3: (A) Variation der massenspezifischen, magnetischen Suszeptibilität ausgewählter magnetischer Minerale mit der Korngröße des jeweiligen Minerals und (B) schematische Abhängigkeit der Volumensuszeptibilität vom Domänenstatus bzw. von der Teilchengröße im Übergangsbereich von SP-, SD-, PSD-, und MD-Teilchen. ....	17
Abbildung 2.4: Mikroskop-Aufnahme (A) und schematische Zeichnung (B) der Mikroskop-Aufnahme eines großen, natürlichen Magnetit-Mehrbeichsteilchens (MD). ....	19
Abbildung 2.5: (A) Modellhafte Hystereseschleife (SD-Form) mit den wichtigsten Schlüsselpunkten und (B) Koerzitivkraftkurven magnetisch weicher und harter Remanenzträger mit unterschiedlichen Volumensuszeptibilitäten und unterschiedlichem Domänenstatus. ....	20
Abbildung 2.6: Magnetfeldanomalie eines ferromagnetischen, kugeligen Störkörpers im Profil (unten) und sein mögliches Aussehen im Magnetogramm (oben). ....	26
Abbildung 2.7: (A) Zu unterschiedlichen Zeiten und bei Unterschiedlichen Raumtemperaturen wiederholte $\kappa$ -Messungen an 4 Innenliner-Bohrkernen vom Hangfuß des östlichen Kalkrieser Berges in Vorwalde bei Venne. (B) Lineare Regression der beiden Messungen mit dem errechneten Korrelationskoeffizient. ....	30
Abbildung 3.1: Lage der Untersuchungsgebiete innerhalb von Großregionen und eine kurze Charakterisierung. ....	36
Abbildung 3.2: Klimadiagramme von Osnabrück und Rahden-Varl. ....	37
Abbildung 3.3: Naturraum und Umgebung des Untersuchungsgebietes Oberesch und des Vergleichsstandortes Lechtinger Esch. ....	38
Abbildung 3.4: Bodentypen am Oberesch. ....	39
Abbildung 3.5: Lage des Eschprofils und die Bodenkundliche Situation in der Umgebung des Lechtinger Esch. ....	41
Abbildung 3.6: Verteilung der Plaggenesche und weiterer, ausgewählter Bodentypen am Übergang zwischen den Großregionen Unteres Weserbergland und Dümmer Geestniederung. ....	43

Abbildung 3.7: Widersprüche zwischen geologischen (rot) und bodenkundlichen (dunkelgrau) Kartierungen der Plaggenesche/Plaggenauflagen. ....	44
Abbildung 3.8: Naturraum und vereinfachte Hydrogeographie des Karlsgrabens. ....	46
Abbildung 3.9: Lage der untersuchten Bereiche und der Messflächen für die Magnetometerprospektion innerhalb des sichtbaren Grabenverlaufs. ....	47
Abbildung 3.10: Klimadiagramm der Stadt Weißenburg. ....	48
Abbildung 4.1: Ergebnisse der Magnetometerprospektion am Oberesch. ....	51
Abbildung 4.2: (A) Magnetogramm A-D im Bereich des Schnittes 48 vor dem Entfernen der Plaggenauflage. (B) Magnetogramm des Schnittes 48 nach dem entfernen der Plaggenauflage. ....	52
Abbildung 4.3: (Oben) Kappogramm des Westprofils des Schnittes 46 mit substratgenetischer Interpretation. (Unten) Repräsentative Photographien aus unterschiedlichen Bereichen des Westprofils des Schnittes 46 mit pedogenetischer Ansprache. ....	54
Abbildung 4.4: Kappmessungen, substrat- (in grün) und pedogenetische (in schwarz) Ansprachen am Nordprofil des Schnittes 48. Hinterlegt sind Fotos des Profils. ....	57
Abbildung 4.5: (Links) Boden- und substratgenetische Ansprache des Plaggeneschprofils am Lechtinger Esch. Gegenübergestellt sind (rechts) die in-situ-VS-Messungen am Profil. ....	59
Abbildung 4.6: Massenspezifische Suszeptibilität, frequenzabhängiger Suszeptibilitätsverlust und bodenchemische Parameter der Bodenproben aller Profile aus den Schnitten 46 und 48 vom Oberesch im Vergleich. ....	61
Abbildung 4.7: Lineare Regressionen der Parameter Gesamteisen gegen MS (links), Gesamteisen gegen Gesamtphosphor (in der Mitte) und Gesamteisen gegen Humusgehalt (rechts). ....	63
Abbildung 4.8: Vergleich von Suszeptibilitätsparametern und bodenchemischen Kennwerten der Plaggeneschprofile vom Lechtinger Esch (oben) und Oberesch (unten). ....	64
Abbildung 4.9: Hysterese- ((A) bis (E)) und ‚Backfield‘-Kurven (F) repräsentativer Proben aus den untersuchten Plaggenauflagen. ....	66
Abbildung 4.10: Thermomagnetische Kurven der ausgewählten Proben aus den Plaggenauflagen. ....	68

Abbildung 4.11: Ein aus Hysterese- und ‚ <i>Backfield</i> ‘-Ratios erstellter Day-Plot (oben) gibt Auskunft über den Domänenstatus von Greigiten aus einer globalen Zusammenstellung. Im Vergleich dazu sind die Plaggenesch-Greigite eingezeichnet. Unten sind derzeit beste Korgrößenabschätzungen für magnetisches Domänenverhalten der Greigite dargestellt. ....	71
Abbildung 4.12: Ergebnisse der Magnetometerprospektion am Karlsgraben. ....	74
Abbildung 4.13: (Oben) Detaildarstellung des 20x20 m-Magnetogramms im Bereich des Querprofils O. Rote Dreiecke kennzeichnen die genaue Lage der Bohrungen. (Unten) Kombination der Sedimentansprache mit Messungen der Volumenssuszeptibilität. ....	77
Abbildung 4.14: Querprofil QP. Dargestellt ist eine Kombination der Sedimentansprache mit Messungen der Volumenssuszeptibilität. ....	78
Abbildung 4.15: Hysteresekurven ((A) bis (F)), ‚ <i>Backfield</i> ‘-Kurven (G) und ein Domänenstruktur-Plot (H) der Proben vom Karlsgraben. ....	80
Abbildung 4.16: Thermomagnetische Kurven der Proben vom Karlsgraben. ....	84
Abbildung 4.17: Ein aus Hysterese- und ‚ <i>Backfield</i> ‘-Ratios erstellter Day-Plot (oben) von Greigiten verschiedener Autoren aus einer globalen Zusammenstellung. Karlsgraben-Greigite sind als violett eingefärbte Kreise eingezeichnet. Unten sind derzeit beste Korgrößenabschätzungen für magnetisches Domänenverhalten der Greigite dargestellt. ....	88
Abbildung 4.18: Stark schematisiertes, vereinfachtes und nivelliertes Längsprofil durch den West-Ost-Bereich des Karlsgrabens mit kombinierter Betrachtung der Tiefenlage und Mächtigkeit organischer Kanalverfüllungen und der Veränderung der Volumenssuszeptibilität der Substrate mit der Tiefe. ....	90
Abbildung 5.1: Schematische Darstellung der Karlsgraben-Methode. ....	96

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Magnetisches Verhalten und VS ausgewählter natürlicher Materialien und wichtigster umweltmagnetischer Eisenoxide und -sulfide. ....	14
Tabelle 2.2: Überblick über unterschiedliche Arten des Magnetismus. ....	23
Tabelle 2.3: Wertespanssen von massenspezifischen Suszeptibilitäten, Domänenstruktur- bzw. Korngrößenabbildenden Ratios und Curie-Temperaturen ausgewählter Remanenzträger. ....	24
Tabelle 2.4: Übersicht, Genauigkeit und Herkunft genutzter fernerkundlicher Sekundärdaten. ....	34
Tabelle 4.1: Ausgewählte magnetische Parameter und domänenstrukturabbildende Ratios der Proben aus den Plaggenauflagen. ....	66
Tabelle 4.2: Übersicht über ausgewählte Suszeptibilitäts- und Magnetisierungsparameter, sowie über Domänenstruktur-Ratios, Curie-Temperaturen und dominante Remanenzträger von Karlsruhen-Proben. ....	81

## Abkürzungen

B	magnetische Induktion, Magnetfeld
B <sub>C</sub>	Koerzitivkraft
B <sub>CR</sub>	Remanenzkoerzitivkraft
BLfD	Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege
bzw.	beziehungsweise
CCM2	<i>„CCM = Catchment Characterisation and Modelling; CCM River and Catchment Database, version 2.1 (CCM2)“</i>
CRM	<i>„chemical remanent magnetization“</i> = chemische Remanenz
$\chi$	massenspezifische Suszeptibilität ( $\chi = \chi_{fr}$ )
$\chi_{fr}$	niederfrequente, massenspezifische Suszeptibilität ( $\chi_{fr} = \chi$ )
$\chi_{fd}$	frequenzabhängiger, massenspezifischer Suszeptibilitätsverlust
$\chi_{fd\%}$	relative, frequenzabhängige, massenspezifische, magnetische Suszeptibilität
DGM	Digitales Geländemodell
dGPS	differentielles Globales Positions-System
DHM	Digitales Höhenmodell
DLM-50	Digitales Landschaftsmodell im Maßstab 1 : 50 000
DOM	Digitales Oberflächenmodell
DOP	Digitales Orthophoto
DRM	<i>„detritial remanent magnetization“</i> = Sedimentationsremanenz
engl.	Englisch
FMS	frequenzabhängige, magnetische Suszeptibilität bzw. Parameter $\chi_{fd}$ und $\chi_{fd\%}$
ggf.	gegebenenfalls
GMTED2010	<i>„Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010“</i>

## Abkürzungen

H	Magnetfeld, Magnetfeldstärke
Hz	Herz, kHz = Kiloherz (Einheit der (Magnetfeld-) Frequenz)
$\kappa$	volumenspezifische, magnetische Suszeptibilität bzw. Volumensuszeptibilität
$\kappa_{lf}$	niederfrequente Volumensuszeptibilität
$\kappa_{hf}$	hochfrequente Volumensuszeptibilität
$\kappa$ -Peak	(auch Kappapeak) Eine deutliche (positive) Auffälligkeit in den Messwerten der Volumensuszeptibilität
LGLN	Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen
LiDAR	<i>„Light Detection and Ranging“</i>
LIRM	<i>„lightning-induced remanence“</i> = Blitzschlaginduzierte Remanenz
M	Magnetisierung
$M_s$	Sättigungsmagnetisierung
$M_{RS}$	Sättigungsremanenz
MD	<i>„multi domain“</i> -Status, magnetische Mehrbereichsteilchen
MS	massenspezifische, magnetische Suszeptibilität $\chi$ , auch $\chi$ -Suszeptibilität
M/T	Temperaturabhängigkeit der Magnetisierung, auch M/T-Kurve oder M/T-Messung
MuPK	Museum und Park Kalkriese
n. Chr.	nach Christus
NRM	<i>„natural remanent magnetization“</i> = natürliche remanente Magnetisierung
o. g.	oben genannt/oben genannter/oben genannte
o. J.	ohne Jahr
o. S.	ohne Seite
PDRM	<i>„post depositional remanent magnetization“</i> = Postsedimentationsremanenz
PSD	<i>„pseudo single domain“</i> -Status

## Abkürzungen

$\rho$	Dichte
SD	„ <i>single domain</i> “-Status, magnetische Einbereichsteilchen
s.	siehe
s. a.	siehe auch
SP	Superparamagnete, superparamagnetisch
SRTM	„ <i>Shuttle Radar Topography Mission</i> “
T	Tesla, nT = Nanotesla, mT = Militesla (Einheit der magnetischen Flußdichte (B))
T <sub>c</sub>	Curie-Temperatur
USGS	„ <i>United States Geological Survey</i> “
u. U.	unter Umständen
u. a.	unter anderem
usw.	und so weiter
TRM	„ <i>Thermoremanent magnetization</i> “ = thermoremanente Magnetisierung
v. a.	vor allem
v. Chr.	vor Christus
VS	Volumenssuszeptibilität $\kappa$ , auch $\kappa$ -Suszeptibilität
VFTB	„ <i>Variable Field Translation Balance</i> “
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil

In der vorliegenden Arbeit sind die weiblichen (Sprach-) Formen den männlichen gleichgestellt. Die Wahl des Genus bei Nomen dient immer der Vereinfachung und leichten Lesbarkeit. Englische Begriffe im Fließtext werden durch *„einfache Anführungszeichen und eine kursive Schrift“* herausgehoben (gilt nicht für das Abstract, für die Abbildungen sowie für die Tabellen).

## 1 Einleitung

### 1.1 Forschungsziel und Relevanz der Arbeit

Das Forschungsziel der vorliegenden Arbeit ist die Adaption und Weiterentwicklung umweltmagnetischer Verfahren im Hinblick auf die (geo-) archäologische Interpretation von Magnetometerdaten. Als Untersuchungsobjekte stehen Boden- und Sedimentarchive im Vordergrund. Dem Autor dieser Arbeit ist wohl bewusst, dass geophysikalische Methoden nicht allein zur Interpretation dieser, oft äußerst komplizierter, Umweltarchive genutzt werden sollten (Evans & Heller 2003; Liu et al 2012). Deshalb wird die Anwendung umweltmagnetischer Verfahren in folgenden Ausführungen integrativ vollzogen. Hierzu werden etablierte, geowissenschaftliche Methoden bzw. bereits vorhandene Boden- und Sedimentkennwerte sowohl zum Vergleich mit den umweltmagnetischen Daten herangezogen, als auch als Zusatzinformation zur Interpretation von umweltmagnetischen Auffälligkeiten und Mustern verwendet.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sind für mehrere wissenschaftliche Disziplinen und Methoden relevant. Größtes Anschlusspotential besteht zur Methode der Magnetometerprospektion und ihrer Anwendung in der (Geo-) Archäologie: eine kombinierte Anwendung von magnetischen Prospektionsverfahren (Aitken 1958; Becker 2000; Gaffney 2008; Faßbinder 2008) mit Messungen umweltmagnetischer Eigenschaften von Böden und Sedimenten (Thompson & Oldfield 1986; Dekkers 1997; Maher & Thompson 1999; Evans & Heller 2003; Liu et al. 2012) soll zur Lösung von Mehrdeutigkeitsproblemen bei der Interpretation von Magnetfeldanomalien beitragen. Weitere Anschlusspotentiale bestehen zur Sedimentologie und zur Bodenkunde (v. a. zur Pedogenese). Böden und Sedimente als Archive der Erd- und Kulturgeschichte (LABO 2011; Siever 1989; Nichols 2009) beinhalten Informationen über menschliche Nutzung und kulturräumliche Entwicklung von Landschaften (Lantsch et al. 2013; Gall et al. 2013). Sie werden dabei als Speichersysteme (Hartge 1983) verstanden, in denen chemisch-, physikalisch- und biologisch-gesteuerte Mineralisierungsprozesse ablaufen (Scheffer/Schachtschabel 2002; Bridge & Demicco 2008; Konhauser 2007). Magnetische Eigenschaften der Böden und Sedimente spiegeln oft solche Mineralisierungsprozesse und/oder Veränderungen von Umweltbedingungen (Maher & Thompson 1999; Evans & Heller 2003). Somit können vorliegende boden- und sedimentmagnetische Untersuchungen zum besseren Verständnis von natürlichen und anthropogen-bedingten Substrat- und Bodenbildungsprozessen in den Umweltarchiven Boden und Sediment beitragen.



## 1.2 Verortung der Arbeit in der Wissenschaftslandschaft

„Es gibt keine unmagnetischen Stoffe. [...] Aufgrund der Allgemeinheit der magnetischen Erscheinungen und ihrer großen praktischen Bedeutung ist die Lehre vom Magnetismus ein wichtiges Gebiet der modernen Physik.“ (Kirenski 1969: 5 u. 6). Dieses Zitat von Kirenski lässt erahnen, wie breit gefächert die Lehre vom Magnetismus ist und wie weit sie mit ihren theoretischen Erkenntnissen und praktischen Anwendungen – insbesondere vor dem Hintergrund der enormen messtechnischen Entwicklungen der letzten Dekaden – tief in viele wissenschaftliche Disziplinen durchdringt. Jedoch macht diese Vielseitigkeit und Breite eine Zuordnung der meisten Arbeiten, die sich mit der omnipotenten Lehre vom Magnetismus beschäftigen, zu einer konkreten Wissenschaftsdisziplin nicht selten schwierig.

In der Geoarchäologie, die im deutschen Sprachraum oft auch als Umweltarchäologie (Bork et al. 2011) bezeichnet wird, ist die Lehre vom Magnetismus in drei Begriffen präsent: als Archäo-, Paläo- und Umweltmagnetik (Schnepf 2011). Den Archäo- und den Paläomagnetismus sieht Soffel (1991) als Teilgebiete des Erdmagnetismus. Sie beschäftigen sich grundsätzlich mit magnetischen Datierungsmöglichkeiten innerhalb archäologischer und erdgeschichtlicher Fragestellungen und sind für die vorliegende Arbeit wenig relevant. Anders die physikalische Grundlage des Paläomagnetismus: der Gesteinsmagnetismus (Soffel 1991; Dunlop & Özdemir 1997) bzw. der angewandte Gesteinsmagnetismus (Tauxe et al. 2016), der heute in den englischsprachigen Grundlagenwerken als ‚*environmental magnetism*‘ (Thompson & Oldfield 1986; Dekkers 1997; Maher & Thompson 1999; Evans & Heller 2003; Liu et al. 2012) zu Tage tritt. Diese lebendige und sich bereits seit über 30 Jahren ständig weiterentwickelnde, geophysikalische Disziplin, nutzt magnetische Parameter eines Substrats dazu, um Informationen über die Vergangenheit und die Gegenwart der Umgebung, aus der dieses Substrat kommt, zu gewinnen (Liu et al. 2012; Tauxe et al. 2016). Weiterhin wird die Umweltmagnetik – dieser Begriff wird im Folgenden mit dem englischen Begriffspaar ‚*environmental magnetism*‘ nach Bleil (2000), Schnepf (2011) und Hemetsberger & Scholger (2006) gleichgesetzt – aber auch herangezogen, um die Ergebnisse von Magnetometerprospektionen zu verstehen und zu interpretieren (Evans & Heller 2003; Fassbinder 2015). Die Arbeiten von Faßbinder (1994), Linford (2003), Fassbinder & Bondar (2013) und Berghausen (2013) zeigen nämlich, dass eine Kombination aus Magnetometerprospektion und der Ermittlung von gesteins-, sediment- und bodenmagnetischen Eigenschaften die (geo-) archäologische Interpretation von Magnetometerdaten entscheidend verbessert.

Eine Aussicht auf die Möglichkeit einer integrativen Zusammenschau umweltmagnetischer und magnetometrischer Ergebnisse nicht nur aus der rein geoarchäologischen, sondern auch aus der bodengenetisch-sedimentologischen Perspektive macht die vorliegende Untersuchung einerseits spannend. Andererseits unterstreicht sie den fundamental-interdisziplinären Charakter des angewandten Gesteinsmagnetismus und seiner Mutterdisziplin, der angewandten Geophysik. In diese

Grundauffassung und in die Forschungstradition von Faßbinder (1994), Linford (2003), Fassbinder & Bondar (2013) und Berghausen (2013) reiht sich auch die vorliegende Arbeit mit ihrem Forschungsziel ein. Und obwohl es sich grundsätzlich um eine schwerpunktmäßig methodische Arbeit handelt, besteht ein wesentlicher Unterschied zu bereits durchgeführten Studien nicht in den angewandten Methoden, sondern in den Untersuchungsgebieten bzw. in betrachteten Boden- und Sedimentarchiven.

### **1.3 Zum Aufbau der Arbeit**

Im Kapitel 2 werden die Grundlagen und die angewandten Methoden kombiniert erläutert. Die beiden Abschnitte wurden vom Autor absichtlich zusammengefasst, mit dem Ziel der Leserin und dem Leser einen einfacheren Zugang zu den recht komplexen, geophysikalischen Verfahren der Umweltmagnetik und der Magnetometerprospektion zu ermöglichen.

Die Untersuchungsgebiete und die darin untersuchten Umweltarchive werden im 3. Kapitel verortet und präsentiert.

Kapitel 4 stellt den umfangreichsten Teil der vorliegenden Arbeit dar. Darin werden die Ergebnisse, an den Untersuchungsgebieten orientierend, in zwei Blöcke unterteilt. Dabei werden bereits bei der Ergebnispräsentation erste Interpretationen angestellt. Am Ende des jeweiligen Blockes findet eine, auf das Ziel der Arbeit ausgerichtete, Diskussion der Ergebnisse im betroffenen Untersuchungsgebiet statt.

Im Kapitel 5 werden aus den diskutierten Ergebnissen Schlussfolgerungen im Hinblick auf die Fragestellungen gezogen. Außerdem werden in diesem Abschlusskapitel, basierend auf den Ergebnissen, mögliche Perspektiven in der Anwendung vorgestellter Methoden sowie grundsätzlicher, geoarchäologisch-umweltmagnetischer Forschung aufgezeigt.

Auf den nächsten Seiten folgt, nach einem Literaturüberblick über den allgemeinen Stand der Disziplin Umweltmagnetik, eine auf die Kombination der Umweltmagnetik mit der Magnetometerprospektion ausgerichtete Betrachtung der aktuellen Forschung. Am Ende dieser Betrachtung werden Forschungslücken aufgezeigt, Problemstellungen und daran orientierte Fragestellungen der Arbeit formuliert.

### **1.4 Stand der Forschung und Fragestellung**

#### **1.4.1 Umweltmagnetik: ein allgemeiner Überblick**

Eine gut lesbare Einführung in die Geschichte und Grundlagen der Lehre vom Magnetismus gibt Kirenski (1969). Jiles (1991) geht in seiner Einführung in den Magnetismus und in die magnetischen

Eigenschaften von Materie hauptsächlich auf die rein physikalischen Theorien und Fragestellungen auf dem Gebiet des Magnetismus ein. Hilzinger & Rodewald (2013) und Du Trémole de Lacheisserie et al. (2005) behandeln den angewandten Magnetismus in der Industrie und industriell erzeugte magnetische Materiale.

Die Grundlagen, Möglichkeiten und Grenzen des Gesteinsmagnetismus handeln Dunlop & Özdemir (1997) in ihrer Monographie sehr ausführlich ab. Mit der Anwendung des Gesteinsmagnetismus in der Archäo- und Paläomagnetik beschäftigen sich Soffel (1991), Butler (2004) und Tauxe et al. (2016).

Der angewandte Gesteinsmagnetismus in umweltmagnetischen Kontexten, also die Umweltmagnetik, wird als eigenständige Disziplin erstmalig bei Thompson et al. (1980) formuliert. 1986 geben Thompson & Oldfield das erste Standardwerk mit dem Titel ‚*Environmental Magnetism*‘ heraus (Dekkers 1997). Nicht einmal zehn Jahre später erscheint bereits der erste Überblicksartikel von Verosub & Roberts (1995). Nur zwei Jahre später publiziert Dekkers (1997) einen weiteren Überblicksartikel zur Umweltmagnetik mit einem Schwerpunkt in der Paläoklima- und der Paläoumweltforschung. Das aktuelle Standardwerk mit dem Titel ‚*Environmental Magnetism. Principles and Applications of Environmental Magnetism*‘ von Evans & Heller stammt aus dem Jahre 2003. Einen aktuellen Überblicksartikel mit einer globalen Sicht auf die Umweltmagnetik liefern Liu et al. (2012).

In den folgenden Zeilen werden einige allgemeine Aspekte der Umweltmagnetik aufgegriffen. Die für die vorliegende Arbeit wichtigen pedogenen und sedimentären, magnetischen Signale im Hinblick auf die Magnetometerprospektion werden im nächsten Kapitel gesondert betrachtet.

Magnetische Verfahren sind extrem sensitiv (Thompson & Oldfield 1986). Faßbinder (1994) gibt Magnetit-Konzentrationen in Bodensubstraten von  $10^{-6}$  Gew.-% an, die von modernen Messapparaturen detektiert werden können. Solche Genauigkeiten sind ein wichtiges Alleinstellungsmerkmal umweltmagnetischer Verfahren, denn bereits kleinste Konzentrationsänderungen magnetischer Minerale können unterschiedliche Bildungsumweltbedingungen widerspiegeln. Dabei können z. B. in (Paläo-) Böden die Konzentrationen magnetischer Minerale derart gering sein, dass sie sich einem chemischen bzw. mineralogischen Nachweis entziehen, wohingegen sie mit magnetischen Verfahren problemlos untersucht werden können (Faßbinder 1994).

Ihre größte Bedeutung erlangte die Umweltmagnetik Mitte der 1980er Jahre in der Paläopedologie, der Paläoklima- und der Paläoumweltforschung. Spektakuläre Ergebnisse wurden an Löss-Paläoboden-Sequenzen des Chinesischen Löss-Plateaus erzielt, wo Heller & Liu (1984) enge Übereinstimmungen der magnetischen Signale dieser Sequenzen mit den  $\delta^{18}\text{O}$ -Aufzeichnungen mariner Sedimente nachgewiesen haben. Da die Bildung magnetischer Eisenminerale an bestimmte regionale und überregionale Umweltbedingungen gebunden war und ist, kam man weiterführend zur Erkenntnis, dass durch die Ermittlung gesteinsmagnetischer Parameter Änderungen in den Umweltbedingungen festgestellt

werden können (Thompson & Oldfield 1986; Liu et al. 2014). Oft können durch eine gesteinsmagnetische Charakterisierung auch Liefergebiete und anthropogen verlagerte Sedimente identifiziert werden (Schnepf 2011). Dies führte wiederum dazu, dass ins Zentrum der umweltmagnetischen Untersuchungen nicht nur Löss, sondern auch marine und limnische Sedimente bzw. Umweltarchive rückten. Die von Maher & Thompson (1999) herausgegebene Aufsatzsammlung und Maher's Überblicksartikel aus dem Jahre 2011 fassen die Untersuchungen, die in diesem Zusammenhang gelaufen sind, zusammen (Maher & Thompson 1999; Maher 2011).

Ein weiterer, bedeutender Aspekt der Umweltmagnetik, der bereits von Thompson & Oldfield (1986) thematisiert wurde, ist die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Boden-, Fluss-, See- sowie Hafenkontamination und magnetischen Eigenschaften der jeweiligen, kontaminierten Medien bzw. Bereiche (Evans & Heller 2003). Dieser Zusammenhang muss bei der Interpretation umweltmagnetischer Auffälligkeiten in Umweltarchiven und magnetischer Anomalien bei Magnetometerprospektionen in geoarchäologischen Kontexten berücksichtigt werden. Für die vorliegende Arbeit können v. a. die Veränderungen magnetischer Eigenschaften durch Schwermetalleinträge in Böden (Hanesch & Scholger 2002; Boyko et al. 2004; Hemetsberger & Scholger 2006), Flüssen (Scholger 1998; Petrovsky et al. 2000) und Mooren (Thompson & Oldfield 1986) relevant sein.

Zusammenfassend zielt die Umweltmagnetik darauf ab, Aussagen über die Konzentration, die Art und die Korngröße magnetischer Eisenminerale in betrachteten Umweltarchiven und Umweltsubstraten zu treffen (Liu et al. 2012). Dabei bildet die Erforschung der Genese und Anreicherung solcher Minerale und Mineralphasen den Kernbereich umweltmagnetischer Untersuchungen. Bereits Thompson und Oldfield (1986) versuchten eine Gruppierung und Systematik natürlicher magnetischer Eisenverbindungen herzustellen. Heute wird eine Tendenz in der Umweltmagnetik deutlich, diese Eisenverbindungen in überregionalen bis teils globalen Zyklen zu sehen (Liu et al. 2012). Aktuelle, ausführliche Überblicksdarstellungen zu Bildung und Vorkommen umweltmagnetisch bedeutender Minerale und Mineralphasen geben Soffel (1991), Cornell & Schwertmann (2003), Evans & Heller (2003) und Tauxe et al. (2016).

Tieferegehende Informationen zu möglichen magnetischen Mineralen in betrachteten Umweltarchiven und Untersuchungsgebieten beinhaltet der folgende Abschnitt. Es werden außerdem Publikationen zu geoarchäologischen, pedogenen und sedimentären magnetischen Signalen im Hinblick auf die Magnetometerprospektion näher betrachtet.

### **1.4.2 Magnetometerprospektion und Umweltmagnetik in der Archäologie**

Unterschiedliche magnetische Eigenschaften archäologischer, aber auch einer ganzen Reihe nicht-archäologischer Objekte verursachen Störungen im lokalen Magnetfeld der Erde (Becker 1996; Neu-

bauer 2001). Solche Störungen lassen sich durch Messungen des Magnetfeldes bzw. seiner Feldkomponenten mittels moderner, hochsensibler Magnetometer und multisensorischer Instrumente detektieren und verorten (Fassbinder 2015).

Als Standardwerke für die Magnetometerprospektion im archäologischen Kontext gelten die Monographien von Neubauer (2001) und Aspinall et al. (2008) sowie der Überblicksartikel von Gaffney (2008). Zum aktuellen Stand der Forschung in der archäologischen Magnetometerprospektion (im Folgenden auch Magnetometrie genannt) gibt Fassbinder (2015) einen ausführlichen Überblick.

Neben den methodischen Untersuchungen zur Magnetometerprospektion in der Archäologie (Faßbinder 2008) behandelt Faßbinder in seinen Publikationen die Magnetometrie und die umweltmagnetischen Eigenschaften der archäologischen Böden immer zusammenhängend (so z. B. Fassbinder (2009) oder Fassbinder & Bondar (2013)). Er schafft somit eine anwendungsorientierte Verbindung zwischen den physikalischen Eigenschaften (Gesteins-, Sediment- und Bodenmagnetismus) des prospektierten Objektes (archäologischer Befund/Fund) und den davon abhängigen Ergebnissen des Potentialverfahrens (Magnetometerprospektion). Neben Faßbinder bringen aber auch Thompson & Oldfield (1986) und Evans & Heller (2003) in ihren umweltmagnetischen Standardwerken die Magnetometerprospektion in den angewandten, archäologischen bzw. den geoarchäologisch-bodenmagnetischen Kontext. Wobei in den beiden Standardwerken, wie auch im Überblicksartikel von Dalan & Banerjee (1998), der Schwerpunkt deutlich in der angewandten Umweltmagnetik liegt und weniger in der Kombination der Umweltmagnetik mit der Magnetometerprospektion.

Der für das Verständnis der Magnetometerprospektion unabdingbare Bodenmagnetismus (engl. ‚*soil magnetism*‘) ist eine der ältesten Strömungen der Umweltmagnetik und geht auf Untersuchungen von Eugène Le Borgne Mitte der 50er Jahre des vergangenen Jahrhunderts zurück. Le Borgne (1955) stellte fest, dass Oberböden oft wesentlich ausgeprägtere magnetische Eigenschaften aufweisen als die Unterböden. Zusammen mit weiteren Autoren führte er diese Auffälligkeit, und damit auch die grundsätzliche Prospektierbarkeit archäologischer Strukturen unter Zuhilfenahme von Magnetometern, auf Brandeinwirkung zurück (Faßbinder (1994) und Becker (1996) nach Le Borgne (1960 und 1965) sowie Scollar (1965)). Wobei sich beim Erhitzen durch Reduktion im Organik-begünstigtem Bodenmilieu aus Hämatit ( $\alpha$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) Magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) und anschließend durch Oxidation stabiler Maghemit ( $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) bildet und im Oberboden anreichert (Le Borgne 1960; Mullins 1977).

Özdemir & Banerjee (1982) und Maher & Taylor (1988) diskutierten in den 80er Jahren eine sekundäre, pedogene Bildung von Magnetit ohne Brandeinwirkung. Die verbesserten magnetischen Prospektionsmethoden, v. a. die hochsensible Cäsiummagnetometrie, intensivierten diese Diskussion, denn viele magnetometrisch-detektierbare, schwache Anomalien konnten mit der Brandhypothese nicht erklärt werden (Faßbinder 1994; Becker 1996; Fassbinder & Bondar 2013). Auf der Suche nach

Gründen für schwach-magnetische Anomalien in Magnetometriedaten wiesen Fassbinder et al. (1990) zuerst im Oberboden eines Gleys Bakterien, die Magnetit produzieren, nach. Etwas später gelang Fassbinder & Stanjek (1993) der Nachweis bakterogenen Magnetits auch in archäologischen Böden und Bodenbefunden (s. a. Faßbinder (1994)). Derweil konnten Evans & Heller (1994) ihrerseits in Löss-Paläobodensequenzen des Chinesischen Plateaus ebenfalls Magnetite und Maghemite nachweisen, die durch bodenbildende, authigene Prozesse entstanden seien sollen. Schließlich konnten Stanjek et al. (1994) im Gr-Horizont eines, auf schwefelreichem Ausgangssubstrat entstandenen, Gleys auch bakterogenen Greigit ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ) nachweisen. Nach all diesen Erkenntnissen wurde allmählich klar, dass nicht nur gebrannte, archäologische Strukturen von Magnetometern erfasst werden können, sondern auch durch pedogene, biogene und ggf. auch technogene, magnetische Minerale angereicherte Boden- bzw. Sedimentbereiche. Voraussetzung für eine erfolgreiche Erfassung ist dabei nur, dass die Befunde einen ausreichenden magnetischen Kontrast zum umgebenden Bodenmaterial bzw. Sediment aufweisen (Neubauer 2001).

Grundsätzlich werden magnetische Eisenverbindungen in archäologische Kontexten in zwei große Gruppen unterteilt: in magnetische Eisenoxide und magnetische Eisensulfide. Eine übersichtliche Zusammenfassung zur Herkunft magnetischer Minerale und Mineralphasen in Böden und zu möglichen magnetischen Mineralen in archäologischen Befunden bieten Fassbinder (2009), Fassbinder & Bondar (2013) und Fassbinder (2015). Aus den ersten beiden geht hervor, dass in nicht verbrannten archäologischen Befunden, wie Gräben, Holzpalisaden und Pfosten biogener Magnetit als Anomalien-erzeuger zu Tage tritt. In verbrannten und gebrannten Strukturen, wie Feuerstellen, Öfen, gebrannten Lehmziegeln, Keramik und Brandhorizonten hingegen, sind Maghemite, Hämatite, Titanomagnetite (Magnetit-Ulvöspinell Mischreihe:  $x\text{Fe}_2\text{TiO}_4 \cdot (1-x)\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) und Titanomaghemite (Oxidationsprodukt der Titanomagnetite) (Soffel 2002) diejenigen, die in den Magnetometerdaten zu Auffälligkeiten führen können. Grundsätzlich ist aus der vorliegenden Literatur abzuleiten, dass vorrangig magnetische Eisenoxide als Magnetfeldanomalien-Erzeuger in archäologischen Böden- und Sedimentarchiven auftreten. Stanjek et al. (1994) postulieren jedoch, dass auch das, in tieferen Bodenhorizonten auftretende, Eisensulfid Greigit für Magnetometerprospektionen von Bedeutung sein kann.

Die aktuelle Publikation von Fassbinder (2015) bietet einen ausführlichen Einblick in die Mannigfaltigkeit magnetischer Signale archäologischer Stätten und Böden. Fassbinder weist in diesem Überblicksartikel außerdem darauf hin, dass eine hinreichende Interpretation von Magnetfeldanomalien unbedingt einer Absicherung durch gesteins- bzw. umweltmagnetische Laboranalysen bedarf.

### 1.4.3 Problem- und Fragestellung

So mannigfaltig archäologische Stätten und darin gemessene umweltmagnetische Signale sind, so unterschiedlich gesteuert und komplex können auch die Entstehungspfade und Anreicherungsprozesse magnetischer Partikel in unterschiedlichen Boden- und Sedimentmilieus sein. Leider wird diese Tatsache oft vernachlässigt, denn meist wird die nichtinvasive Magnetometerprospektion allein und ohne boden- und sedimentmagnetische Überprüfung der Ergebnisse im Labor angewandt. Dies führt, neben Fehlinterpretationen von Magnetfeldanomalien, auch dazu, dass umweltmagnetische Prozesse in vielen, archäologisch bedeutsamen Böden unverstanden bleiben. Zu solchen bodenmagnetisch nicht untersuchten und damit umweltmagnetisch-unverstandenen Bodenarchiven gehören auch die im nordwestdeutschen Raum weit verbreiteten Plaggenesche (Eckelmann 1980; Greiten 2013; Makowsky et al. 2013).

Wie bereits angedeutet, haben magnetische Eisenoxide im archäologischen Kontext eine größere Bedeutung, nicht zuletzt weil magnetische Eisensulfide in Oberböden bisher gar nicht und oberflächennah nur ein einziges Mal nachgewiesen wurden (nach Fassbinder (2009 und 2015)). Die Eisensulfide – Allen voran der Greigit – gewinnen jedoch rasch an Bedeutung, sobald man mit magnetometrischen und umweltmagnetischen Verfahren in den Bereich wassergesättigter, anoxischer (nach Roberts et al. (2011), Stanjek et al. (1994) und Linford (2003)), geoarchäologischer Archive (Needham & Macklin 1992; Göttlich 1990; Lang 1994) kommt. Auf die geoarchäologisch hoch relevanten, fluvialen, semiterrestrischen Umweltarchive abzielend, spricht Weston (2001) den Paläokanälen (engl. *Palaeochannel*) eine besondere Bedeutung zu. Paläokanäle (hier v. a. holozäne) wurden bereits von Weston (2001), Walford (2013), Horsley et al. (2014) und vom Autor selbst, auf archäologisch-bedeutenden Standorten in der Nähe von Flüssen, als lineare, schwach-positive Magnetfeldanomalien erfasst. Warum sie in Magnetometerdaten erscheinen, bzw. welche magnetische Minerale und remanente Magnetisierungen für ihr Erscheinen verantwortlich gemacht werden können, wurde bisher noch nicht untersucht.

Da der Begriff Paläokanal nicht eindeutig definiert ist, wird im Folgenden zwischen natürlich entstandenen, verlandeten (z. B. alten Flussläufen) und anthropogen angelegten, verlandeten Paläokanälen im wasserbaulichen Sinne nicht unterschieden.

Vor dem Hintergrund des in der Einleitung formulierten Forschungszieles allgemein und um einen Beitrag zur Schließung oben genannter Forschungslücken im Speziellen zu leisten, widmet sich die vorliegende Arbeit im Bereich der Bodenarchive zunächst der Forschungsfrage:

- (1) welche magnetischen Eigenschaften zeigen die braunen Plaggenesche in Hügel- und Vorländern am Übergang vom Mittelgebirge in die nordwestdeutsche Tiefebene?

Im Hinblick auf die Interpretation von Daten aus Magnetometerprospektionen in Bereichen der braunen Plaggenesche und somit auf das Ziel der vorliegenden Arbeit fokussierend, soll die Frage geklärt werden:

- (2) wie wirken sich die magnetischen Eigenschaften der untersuchten, braunen Plaggenesche auf die Magnetometerprospektion in diesen Bereichen aus?

Im Fall fluviatiler, semiterrestrischer Umweltarchive in Paläokanälen wurde der, bereits geoarchäologisch gut untersuchte, Karlsgraben (auch Fossa Carolina genannt) ausgewählt (Ettel et al. 2014). In Magnetometerdaten tritt sein Grabenverlauf zum Teil als Paläokanal nach Weston (2001) auf. Außerdem wurden hier weitere, den Kanal flankierende, lineare Anomalien erfasst (Zielhofer et al. 2014; Linzen & Schneider 2014). So wird in diesem Untersuchungsgebiet folgenden Fragen nachgegangen:

- (3) welche Sedimentschichten in den Paläokanälen und den linearen Begleitstrukturen des Karlsgrabens fungieren als Magnetfeldanomalien-erzeugende Störkörper und
- (4) auf welche magnetische Mineralphasen in den Störkörpern ist das Auftreten von Paläokanälen und Begleitstrukturen in den Magnetometerdaten des Karlsgrabens zurückzuführen?

Der Methodenmix, der zur Beantwortung der Forschungsfragen angewandt wird sowie die Grundlagen angewandter umweltmagnetischer und magnetometrischer Verfahren werden im Folgenden Kapitel ausführlich erläutert.



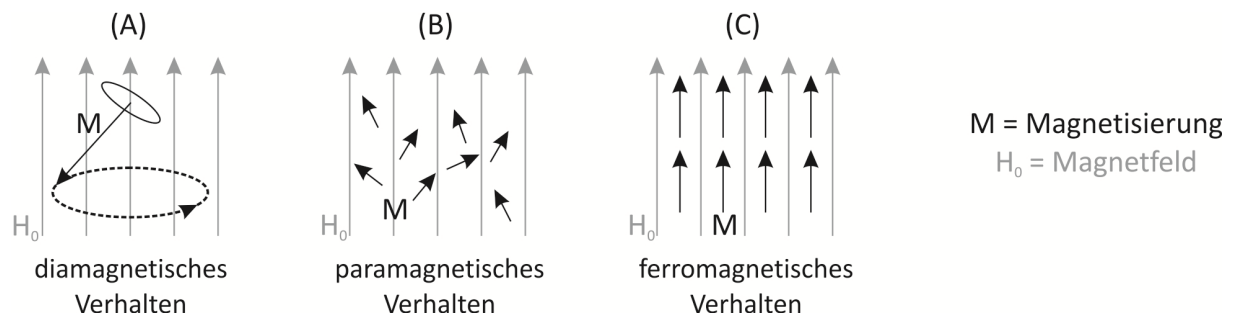
## 2 Grundlagen und Methoden

### 2.1 Grundlagen und Methoden der Umweltmagnetik

#### 2.1.1 Messungen in uniformen und variablen Magnetfeldern

Der Magnetismus, in all seinen Ausprägungen, geht auf Bewegungen elektrisch-negativ geladener Elektronen um ihre positiv geladenen Atomkerne zurück. Dabei erzeugen die Elektronen, als elementare Träger des Magnetismus, magnetische Ströme. Man unterteilt diese Elementarströme in Bahn- und Spinmomente. Die oft auch als Orbitalmomente bezeichneten Bahnmomente bilden die Elektronen beim Umkreisen der Atomkerne auf der Elektronenumlaufbahn. Zusätzliche Spinmomente erzeugen die Elektronen bei der Rotation um die eigene Achse. Die Bahn- und Spinmomente fungieren bereits jeder für sich als kleinste Elementarmagnete. Dabei bilden sie ein Dipolmoment und somit die einfachste Form eines Magnetfeldes. Es ist das niedrigste, nichtverschwindende magnetische Moment eines Magnetfeldes. In elementaren Dipolmomenten haben sowohl Magnetfelder stromdurchflossener Leiterschleifen als auch das Erdmagnetfeld ihren Ursprung (Kirenski 1969; Soffel 1991; Jiles 1991; Neubauer 2001; Hilzinger & Rodewald 2013; Schmitt 2015).

In Magnetfeldern zeigen Materialien aus unterschiedlichen atomaren Zusammensetzungen mit verschiedenartigen magnetischen Momenten auch unterschiedliches magnetisches Verhalten. Wie bei Evans & Heller (2003) wird hier zunächst fundamental zwischen diamagnetischem, paramagnetischem und ferromagnetischem Verhalten der Materie in Magnetfeldern unterschieden (Abb. 2.1).



**Abbildung 2.1: Fundamentale magnetische Ordnungen innerhalb eines uniformen Magnetfeldes (nach Schmitt (2015) und Evans & Heller (2003)).**

Die Bahn- und Spinmomente der Elektronen in allen Atomen haben zwecks Energieminimalisierung ein Bestreben sich auszugleichen bzw. zu kompensieren. Vielen atomaren und/oder molekularen Kollektiven (u. a. Paramagnetika, Beispiele dafür folgen im nächsten Absatz) gelingt dies nicht gänzlich und es entstehen unkompenzierte magnetische Momente. Als Reaktion darauf wird solchen Materialien vom Magnetfeld eine magnetische Polarisierung auferlegt bzw. eine Magnetisierung in Richtung des Magnetfeldes induziert (Soffel 1991; Kirenski 1969; Abb. 2.1 (B) und (C)). Einigen Stoffen gelingt die Kompensation magnetischer Momente hingegen gänzlich. Diesen wird durch die Wechselwirkung

zwischen dem angelegten Feld und den Bahnmomenten eine dem Magnetfeld entgegen gerichtete Magnetisierung induziert. Folge dieser Wechselwirkung ist, dass solche Materialien Magnetfelder abstoßen können (Soffel 1991). Man nennt dieses magnetische Verhalten diamagnetisch bzw. Diamagnetismus (Abb. 2.1 (A)). Wasser, Quarz oder auch viele organische Verbindungen zeigen diamagnetisches Verhalten (Kirenski 1969). Im Grunde und Ursprung ist jede Materie diamagnetisch. Der schwache Diamagnetismus wird jedoch in vielen Substanzen durch den viel stärkeren Paramagnetismus und den sehr viel stärkeren Ferromagnetismus überdeckt (Evans & Heller 2003).

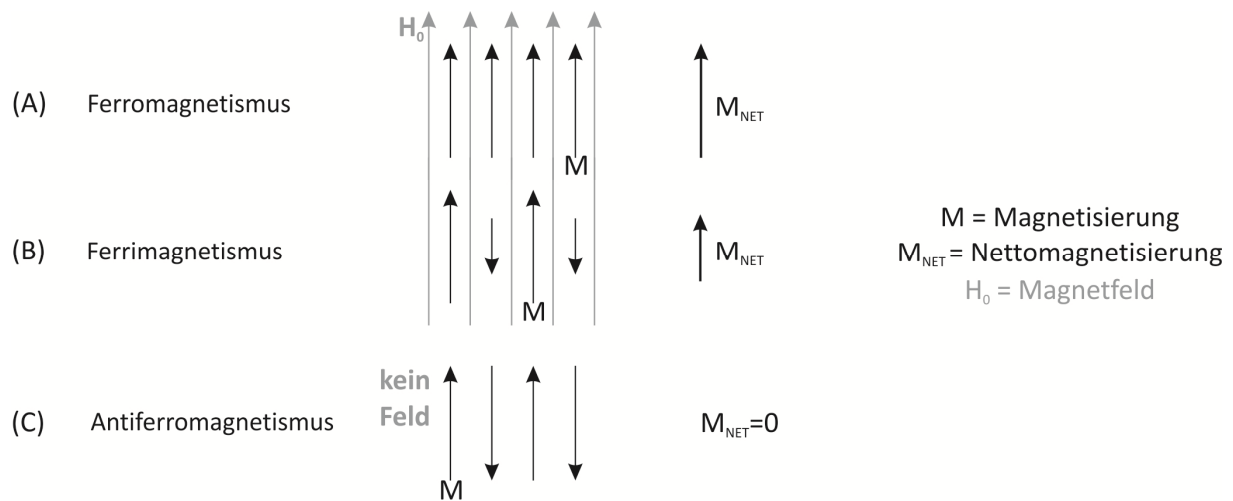
In der Umweltmagnetik ist der Paramagnetismus viel bedeutender als der Diamagnetismus, weil natürliche paramagnetische Substrate bereits Minerale der Eisengruppe (Fe, Co, Ni) besitzen können (Evans & Heller 2003; Soffel 1991). Ihre Elementarmagnete zeigen bei Raumtemperatur zwar keine Wechselwirkungen und liegen oft unregelmäßig im Substrat vor, jedoch weisen sie bereits eine Vorzugsrichtung auf, nämlich in Richtung des angelegten Magnetfeldes (Abb. 2.1 (B)). Beispiele für natürliche paramagnetische Minerale sind Feldspäte, Biotite, Pyroxene u. a., Gase  $O_2$  und  $O$  sowie einige Metalle wie Mangan, Platin usw. Paramagnetisches Verhalten weisen außerdem Salze der Seltenen Erden und Salze von Eisen auf (Kirenski 1969). Grundsätzlich zeigen die natürlichen Paramagnetika eine relativ hohe, v. a. an den Gehalt an  $Fe^{2+}$  und/oder  $Fe^{3+}$  sowie  $Mn^{2+}$  gebundene, Variationsbreite (Soffel 1991; Thompson & Oldfield 1986).

In Stoffen, die ferromagnetisches Verhalten zeigen, werden der Dia- und der Paramagnetismus vom sehr viel stärkeren Ferromagnetismus überlagert. Als solcher wird ganz allgemein ein magnetischer Ordnungszustand bezeichnet, bei dem alle Elementarmagnete stark miteinander in Wechselwirkung treten und sich parallel zur Magnetfeldlinienrichtung aufstellen (Abb. 2.1 (C)). Wie die Benennung bereits suggeriert, ist der reine Ferromagnetismus dem metallischen Eisen (sowie Kobalt und Nickel) eigen und tritt in natürlichen, gesteinsbildenden Substraten und Mineralen nicht auf (Soffel 1991; Dearing 1999; Evans & Heller 2003). In natürlichen Mineralen sind die nächsten Verwandten des Ferromagnetismus anzutreffen: der Antiferromagnetismus und der Ferrimagnetismus (Abb. 2.2 (C) und (B)).

Der Antiferromagnetismus zeigt eine streng paarweise antiparallele Ausrichtung gleicher magnetischer Momente. Dadurch, dass sich die Elementarmagnete gegenseitig aufheben und damit die Summe der magnetischen Momente bzw. die Nettomagnetisierung bei fehlendem Magnetfeld gleich Null ist, ist diese magnetische Ordnung im Grunde dem Paramagnetismus sehr ähnlich (Abb. 2.2 (C)). Sobald sich aber magnetische Felder einstellen, verkanten die magnetischen Momente der natürlichen Antiferromagnetika (Tab. 2.2). Wenn sich weiterführend die magnetischen Momente des Antiferromagnetikums geringfügig unterscheiden, z. B. durch Dreh und Umklappprozesse, denen die Elementarmagnete in Magnetfeldern unterworfen sind, stellt sich der Ferrimagnetismus ein (Soffel 1991; Hilzinger & Rodewald 2013). Bei diesem, für die Umweltmagnetik wichtigsten Ordnungszustand liegen die

ungleichen magnetischen Momente ebenfalls antiparallel. Anders jedoch als die Antiferromagnetika zeigen ferrimagnetische Materialien deutliche und teils starke spontane Nettomagnetisierungen (Abb. 2.2 (B) und Tab. 2.2) (Dunlop & Özdemir 1997).

Natürliche Ferrimagnetika zeigen also, abhängig von Anzahl und Art an Fe-Ionen in Untergittern, unterschiedliche magnetische Eigenschaften (Dunlop & Özdemir 1997). Zu verstehen, wie sich diese Eigenschaften in magnetischen Messungen äußern, welche Prozesse zum bestimmten magnetischen Verhalten und zum Entstehen ferrimagnetischer Mineralphasen in Umweltmaterialien führen, ist das Hauptanliegen der umwelt- und gesteinsmagnetischen Forschung.



**Abbildung 2.2: Ausgewählte Möglichkeiten der Anordnung von austausch-gekoppelter Spin-Strukturen in Materialien mit unterschiedlichem ferromagnetischen Verhalten und die daraus resultierende Nettomagnetisierung (nach Dunlop & Özdemir (1997) und Schmitt (2015)).**

Zur Vereinfachung werden in weiteren Grundlagen-Ausführungen für ferro- und ferrimagnetische Ordnungen die von Soffel (1991) geprägten Bezeichnungen Ferro(i)magnetismus und ferro(i)magnetisch genutzt.

Umweltmaterialien kann bereits im Gelände, am Bodenprofil oder im archäologischen Schnitt, also in situ, eine der o. g. magnetischen Verhaltensweisen zugeordnet werden. Dies geschieht durch die Messung der umweltmagnetischen Größe Suszeptibilität. Diese wichtige Größe und ihre Parameter werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

### 2.1.1.1 Volumensuszeptibilität (VS)

Die magnetische Suszeptibilität oder auch die Übernahmefähigkeit der Materie für magnetische Felder zeigt wie leicht oder schwer Materie – im vorliegenden Fall die Substrate Boden und Sediment – unter Einwirkung eines äußeren Magnetfeldes magnetisiert werden kann. Am leichtesten lassen sich metalli-

sche Eisenverbindungen durch Anlegen eines Magnetfeldes bzw. Magneten magnetisieren. Ein Phänomen, das sehr gut anhand einer Kompassnadel erklärt werden kann: Aufgrund der ferromagnetischen Ordnung ihrer Elementarmagnete übernimmt die metallische Eisennadel die Kraft des Erdmagnetfeldes und dreht sich parallel zur Richtung der Feldlinien. Sie weist damit eine sehr hohe Magnetisierbarkeit bzw. eine sehr hohe, positive, magnetische Suszeptibilität auf. Ganz anders als die diamagnetischen Materialien, die magnetische Felder und Flussdichten herausdrängen und abstoßen. In solchen Fällen ist die Suszeptibilität negativ. Ein Extrembeispiel für dieses Phänomen ist die magnetische Levitation, auch als magnetisches Schweben bekannt (Scharlau et al. 2003; Maher et al. 1999; Evans & Heller 2003; Dearing 1999).

Die Suszeptibilität als physikalische Materialeigenschaft ist temperaturabhängig (ausgenommen Diamagnetismus) und wird im einfachsten Fall durch die Formel

$$\kappa = M / H \text{ (}\kappa\text{-Einheit SI } 10^{-6}\text{)} \text{ (Formel 1)}$$

(Volumensuszeptibilität (im Folgenden auch VS) = Magnetisierung pro Volumeneinheit / Magnetfeld)

ausgedrückt. Der aus dieser Verhältnisbildung realisierende, materialcharakterisierende Parameter Volumensuszeptibilität  $\kappa$  wird als eine dimensionslose, „reine Zahl“ (Maher et al. 1999: 37) verstanden und in der Einheit SI (Internationales Einheitssystem) angegeben. Die Einheit SI ist möglich, weil sowohl die Magnetisierung pro Volumeneinheit (M) als auch das Magnetfeld (H) in der Einheit A/m (Ampere pro Meter) gemessen werden.

Wie die Tab. 2.1 zeigt und im Vorfeld angedeutet wurde, können mit Hilfe der VS erste, grobe Klassifizierungen magnetischen Verhaltens vorgenommen werden. Wobei eine Unterscheidung zwischen antiferromagnetischem und paramagnetischem Verhalten schwierig ist, weil sich aus der Literatur teils sehr ähnliche Suszeptibilitätswerte (z. B. bei Dearing (1999: 36) oder Cornel & Schwertmann (2003: 162)) für die beiden magnetischen Ordnungen ergeben. Die Tabelle zeigt aber auch, dass der Kreis der verdächtigen, umweltmagnetischen Minerale in Substraten mit Hilfe der Leitgröße  $\kappa$  bereits etwas eingegrenzt werden kann. So wird in vorliegender Arbeit die Volumensuszeptibilität als robuster, gut reproduzierbarer (Kap. 2.3), geophysikalischer Indikator für magnetische Auffälligkeiten in Boden- bzw. Sedimentarchiven im Hinblick auf die Magnetometerprospektion, aber auch zur grundsätzlichen magnetischen Charakterisierung von Böden und Sedimenten, genutzt.

Eine weitere, vorteilhafte Eigenschaft der VS haben Thompson & Oldfield (1986) bei ihren Untersuchungen an natürlichen Substraten mit unterschiedlichen Magnetitgehalten und -korngrößen beobachtet: Die  $\kappa$ -Suszeptibilität reflektierte bei ihren Messungen, weitestgehend korngrößenunabhängig, den Magnetitgehalt im gemessenen Material. Diese Erkenntnis führte u. a. dazu, dass einige Autoren  $\kappa$  für die Schätzung der Konzentration magnetischer Materialien in natürlichen Substraten als

den zuverlässigsten Proxyparameter ansehen (z. B. Bleil (2000)). Andere Autoren, wie z. B. Soffel (1991), sprechen bei bestimmten Korngrößen und Magnetomineralen von einer gewissen Korngrößenabhängigkeit der Volumenssuszeptibilität (s. a. Abb. 2.3 (B)). Dies wird im nächsten Kapitel nochmal aufgegriffen und tiefer durchleuchtet.

Die VS als Proxyparameter in Böden wurde schon von Eugène Le Borgne genutzt (s. a. Kap. 1.4.2). Bereits vor dem Erscheinen der Umweltmagnetik als eigenständige Disziplin brachte Mullins (1977) einen Überblicksartikel, der sich mit der Bedeutung der VS in der Bodenkunde beschäftigt. Heute findet diese geophysikalische Größe eine breite Anwendung in der Geoarchäologie (s. z. B. Brückner (2011)), als Bodenreferenzsignal (Hanesch & Scholger 2005; Maher 1986), als ein bereits in Kap. 1.3.1. erwähnter Proxy für Schwermetallkontamination und neuerdings auch in bodenökologischen Studien und Fragestellungen als Proxy für die Bodenfeuchte (Grimley et al. 2008; Quijano et al. 2014)

**Tabelle 2.1: Magnetisches Verhalten und VS ausgewählter natürlicher Materialien und wichtigster umweltmagnetischer Eisenoxide und -sulfide nach Soffel (1991), Dunlop & Özdemir (1997), Dearing (1999), Snowball & Torii (1999), Evans & Heller (2003), Cornel & Schwertmann (2003) und Scharlau et al. (2003).**

Magnetisches Verhalten	$\kappa$ bei Raumtemperatur	Natürliche Materialien und magnetische Verbindungen
<b>ferro(i)magnetisch</b>	$\kappa \gg 0$	Eisenoxide: Magnetit, Maghemit, Titanomagnetit und Titanomaghemit; Eisensulfide: Greigit und monoklinischer Pyrrhotin.
<b>antiferromagnetisch</b>	$\kappa > 0$ (moderat)	Eisenoxide: Hämatit, Goethit und Lepidokrokit; Eisensulfid: hexagonaler Pyrrhotin
<b>paramagnetisch</b>	$\kappa > 0$ (schwach)	Viele Fe-haltige Minerale (z. B. Siderit) und Salze (z. B. Pyrit); Tonminerale: Illit, Montmorillonit
<b>diamagnetisch</b>	$\kappa < 0$	Wasser, Organisches Material, Quarz, Calciumcarbonat, Gold, Graphit

Ausführlichere Beschreibungen zur Magnetisierbarkeit bzw. zur magnetischen Volumenssuszeptibilität sowie zu ihren elektromagnetischen Ursachen und Gesetzmäßigkeiten, aber auch zu ihrem Verhältnis zu anderen magnetischen Größen, finden sich bei Dearing (1999), Evans & Heller (2003), Maher & Thompson (1999), Thompson & Oldfield (1986) und Soffel (1991). Ferner stellt Dearing (1999: 37) ein hilfreiches Schema zur Interpretation der VS in Umweltmaterialien bereit.

Im Rahmen vorliegender Untersuchungen wird die Volumenssuszeptibilität im Grabungsschnitt, am Bodenprofil, an (geschlossenen) Rammkernsonden-Innenlinern oder an offenen Moor-Kammerbohrungen mit den Bartington MS3-Meter-MS2K-Sensor/MS2C-Sensor (MS2C-Sensor an Innenlinern) Konfigurationen gemessen. Vor der Messung werden die Sensoren nach Herstellervorgaben kalibriert und durch das Halten in die Luft auf Null („Zeroing“) gestellt (Bartington Instrumets Ltd. 2016a). Bei der Messung mittels MS2K wird stets auf vollständigen Sensor-Boden/Sediment-Kontakt

geachtet. Innenliner mit Sedimentkern werden bei der Messung mit dem MS2C immer konzentrisch in der Öffnung (*Loop*) des Sensors platziert. Nach den Messungen geben die Meter/Sensor-Konfigurationen schließlich die Volumenssuszeptibilität als SI-Wert aus.

Bei den *in situ* Messungen mit dem MS2K in Grabungsschnitten wird darauf geachtet, dass sowohl der sichtbare archäologische Befund als auch das Anstehende, in dem dieser eingebettet ist, gemessen wird. An Bodenprofilen und an Profilbefunden in Grabungsschnitten beträgt der (Tiefen-) Messabstand 2 bis maximal 10 cm. Bei  $\kappa$ -Messungen mit dem MS2C-Sensor an Rammkernsonden-Innenlinern beträgt der Messabstand immer 2 cm.

### **2.1.1.2 Massenspezifische (MS) und frequenzabhängige Suszeptibilität (FMS)**

Nach Vincenz (1965) ist die Suszeptibilität als Materieeigenschaft von der Frequenz und der Stärke des angelegten Magnetfeldes abhängig. Diese Frequenzabhängigkeit wird in künstlich erzeugten, unifornen Magnetfeldern, unter Laborbedingungen, mit der Bartington MS3-Meter-MS2B-Sensor Konfiguration ermittelt. Der MS2B-Sensor kann zwei Magnetfelder erzeugen, in denen die niederfrequenten und die hochfrequenten Anteile der Volumenssuszeptibilität gemessen werden können. Nach Dearing et al. (1996) wird in einem Feld von 0,47 kHz und 0,05 mT die niederfrequente Volumenssuszeptibilität  $\kappa_{lf}$  (Kappa *low frequency*) gemessen. Bei der Magnetfeldfrequenz von 4,7 kHz wird die Probe einem Hochfrequenzfeld ausgesetzt und die hochfrequente Volumenssuszeptibilität  $\kappa_{hf}$  (Kappa *high frequency*) ermittelt.

Aus  $\kappa_{lf}$  und  $\kappa_{hf}$  (beide in Einheit SI \* 10<sup>-6</sup>, im Folgenden auch SI<sup>-6</sup>) lassen sich alle weiteren Suszeptibilitätsparameter errechnen, darunter einer der wichtigsten:

$$\chi_{lf} = \kappa_{lf} / \rho \quad (\chi_{lf}\text{-Einheit } 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}) \quad (\text{Formel 2})$$

$\chi_{lf}$  (Chi *low frequency*, im Folgenden  $\chi$  und/oder MS) wird massenspezifische magnetische Suszeptibilität genannt (Evans & Heller 2003; Dalan & Banerjee 1998). Da  $\kappa$  dimensionslos ist, trägt  $\chi$  die Einheit der reziproken Dichte.

Wie die Bezeichnung bereits andeutet, spiegelt  $\chi$  den Massenanteil aller magnetischen Partikel in einer Probe wieder (Dearing 1999; Evans & Heller 2003). Die MS ist der am häufigsten genutzte Suszeptibilitätsparameter. Aufgrund seiner häufigen Anwendung konnte auch seine Abhängigkeit von der Korngröße umweltmagnetischer Minerale untersucht werden. Dabei kamen Peters & Dekkers (2003) zu dem Schluss, dass die massenspezifische Suszeptibilität  $\chi$  im Vergleich zu anderen magnetischen Parametern tatsächlich die geringste Korngrößenabhängigkeit zeigt. Dies trifft insbesondere, wie bereits von Thompson & Oldfield (1986) festgestellt, für das Mineral Magnetit zu (Abb. 2.3 (A)).

Dennoch zeigt  $\chi$  in Korngrößenbereichen zwischen 0,01 und 10  $\mu\text{m}$  für andere Magnetominerale eine gewisse Korngrößenabhängigkeit (Abb. 2.3 (A)). In diesem, auch als SP-SD-Domänenübergang genannten Bereich (magnetische Domänen werden im Kap. 2.1.1.3 erläutert), weisen die  $\chi$ -Werte aller Magnetominerale die höchste Streuung auf (Dearing 1999; Peters & Dekkers 2003), wobei im Korngrößenbereich von etwa 0,1 bis 1  $\mu\text{m}$  (SD-PSD-Domänenübergang) die niedrigsten  $\chi$ - und  $\kappa$ -Werte erreicht werden (Peters & Dekkers 2003; Cornell & Schwertmann 2003; Soffel 1991) (Abb. 2.3). Liu et al. (2012) führen diese Streuung und teils scharfe Abnahme der Suszeptibilität auf komplexe feld-, form- und korngrößenabhängige Elektronenspin-Strukturen in natürlichen magnetischen Mineralen im betrachteten Domänenbereich zurück. In der Praxis wird diese Annahme genutzt, um unter Zuhilfenahme oben erläuterter hoch- und niederfrequenter Volumensuszeptibilitäten qualitative Abschätzungen der kleinsten magnetischen Korngrößen zu realisieren:

$$\chi_{fd} = (\kappa_{lf} - \kappa_{hf}) / \rho \quad (\chi_{fd}\text{-Einheit } 10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}) \text{ (Formel 3)}$$

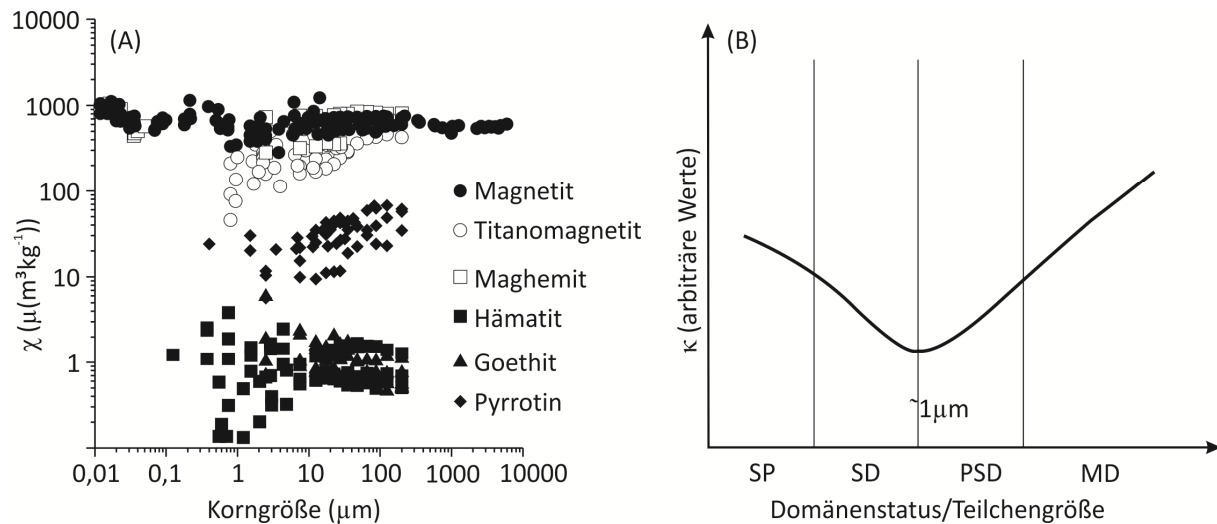
$\chi_{fd}$  (Chi, *frequency dependent*) wird als frequenzabhängige Suszeptibilität oder richtiger als frequenzabhängiger Suszeptibilitätsverlust bezeichnet. Physikalischer Hintergrund ist die Annahme, dass sich bei hohen Magnetfeldfrequenzen nicht alle magnetischen Partikel einer Probe magnetisieren lassen (nach Stephenson (1970)). Magnetische Teilchen, deren Korngröße kleiner als etwa 0,03  $\mu\text{m}$  ist, tragen nur zur Magnetisierung im niederfrequenten Bereich bei. In hochfrequenten Magnetfeldern bleiben diese Superparamagnete (SP) „neutralisiert bzw. eingefroren“ (Faßbinder 1994: 106) (Anhang A). Anders formuliert, es werden beim frequenzabhängigen Suszeptibilitätsverlust  $\chi_{fd}$  die hochfrequenten Massenanteile aus der gesamten Konzentration magnetischer Partikel herausgerechnet, so dass dieser Parameter nur den Massenanteil aller SP-Teilchen in der Probe widerspiegelt (Evans & Heller 2003). Dabei muss nach Dearing et al. (1996) und Dearing (1999) beachtet werden, dass ein messbarer Suszeptibilitätsverlust erst dann gegeben ist, wenn  $\kappa_{lf} > \kappa_{hf}$  ist und zwischen  $\kappa_{lf}$  und  $\kappa_{hf}$  ein Unterschied von  $4 \text{ SI}10^{-6}$  herrscht. Ist dies gegeben und liegt der  $\kappa_{lf}$ -Wert höher als  $20 \text{ SI}10^{-6}$ , kann der Massenanteil an SP, bezogen auf alle magnetischen Domänen in der Probe, relativiert werden:

$$\chi_{fd\%} = (\kappa_{lf} - \kappa_{hf} / \kappa_{lf}) * 100 \text{ (in \%)} \text{ (Formel 4)}$$

$\chi_{fd\%}$  stellt den relativen Anteil an SP unter allen magnetischen Partikeln in der Probe dar.

In Böden wurden bisher max. 12-14 % SP gemessen.  $\chi_{fd\%}$ -Werte, die darüber liegen sind auf Messfehler (z. B. durch Kontamination oder Anisotropie der Suszeptibilität) zurückzuführen. Bei  $\chi_{fd\%}$ -Werten, die unter 2 % liegen spricht man von einem nicht schätzbaren SP-Anteil. In den Ergebnisdarstellungen werden somit nur die  $\chi_{fd\%}$ -Werte angegeben, welche die o. g. Kriterien erfüllen (nach Dearing et al. (1996)).

Tieferegehende physikalische Hintergründe und ausführliche Informationen zur Theorie und Messung der Frequenzabhängigkeit der Suszeptibilität (FMS) sind bei Dearing et al. (1996), Stephenson (1970) und Vincenz (1965) dargestellt. Dearing et al. (1996) und Dearing (1999) liefern außerdem Ansätze (z. B.  $\chi_{fd\%}$  gegen  $\chi_{df}$ -Plots), wie die FMS in Bezug auf Anreicherungsquellen magnetisierbarer frequenzabhängiger Partikel interpretiert werden kann.



**Abbildung 2.3: (A) Variation der massenspezifischen magnetischen Suszeptibilität ausgewählter magnetischer Minerale mit der Korngröße des jeweiligen Minerals (Peters & Dekkers 2003: 661, verändert) und (B) schematische Abhängigkeit der Volumenssuszeptibilität vom Domänenstatus bzw. von der Teilchengröße im Übergangsbereich SP-, SD-, PSD- und MD-Teilchen (Soffel 1991: 40, modifiziert).**

Für die Ermittlung der MS und der FMS im Labor wird ein diamagnetischer Plastikbehälter mit frischem Probenmaterial befüllt. Aus dem Volumen des Behälters sowie aus der Differenz des Gesamtgewichts und des Gewichts des leeren Behälters wird die Dichte ( $\rho$ ) der Probe errechnet (notwendig für die Formeln 2 und 3). Schließlich wird der Behälter mit Probe und nach Vorgaben von Dearing et al. (1996) in die Öffnung des MS2B gestellt, wo die hoch- und niederfrequenten Volumenssuszeptibilitäten durch jeweils drei gemittelte Wiederholungsmessungen bei Zimmertemperatur ( $\sim 20^\circ\text{C}$ ) ermittelt werden.

Im Hinblick auf das Ziel der vorliegenden Arbeit erlauben VS-Messungen die Detektion eines magnetometrisch erfassten (ggf. archäologischen) Störkörpers im Bodenprofil und/oder einer Anomalieerzeugenden Sedimentschicht in der Bohrung. Mit Hilfe der FMS können erste verlässliche Aussagen in Bezug auf die feinste magnetische Kornfraktion (SP) gemacht werden. Ein komplettes magnetomineralogisches Bild eines Störkörpers oder eines Umweltarchivs können die Parameter der magnetischen Suszeptibilität jedoch nicht liefern. Weitere gesteins- bzw. umweltmagnetische Messungen sind dazu notwendig.



### 2.1.1.3 Domänenstatusermittlung aus Hysterese- und Koerzitivkraftmessungen

Die im Folgenden beschriebenen Hysterese- und Koerzitivkraftmessungen sowie die thermomagnetischen Messungen (Kap. 2.1.2) wurden in einem ‚Variable Field Translation Balance‘ (im Folgenden VFTB) der Sektion Geophysik am Department für Geo- und Umweltwissenschaften der Ludwigs-Maximilians-Universität München unter Anleitung und Betreuung von PD Dr. Jörg W. Faßbinder und Prof. Dr. Nikolai Petersen durchgeführt. Die Visualisierung, Analyse und Interpretation der Ergebnisse aus VFTB-Messungen wurden durch die RockMagAnalyser-Software (Leonhardt 2006) gestützt.

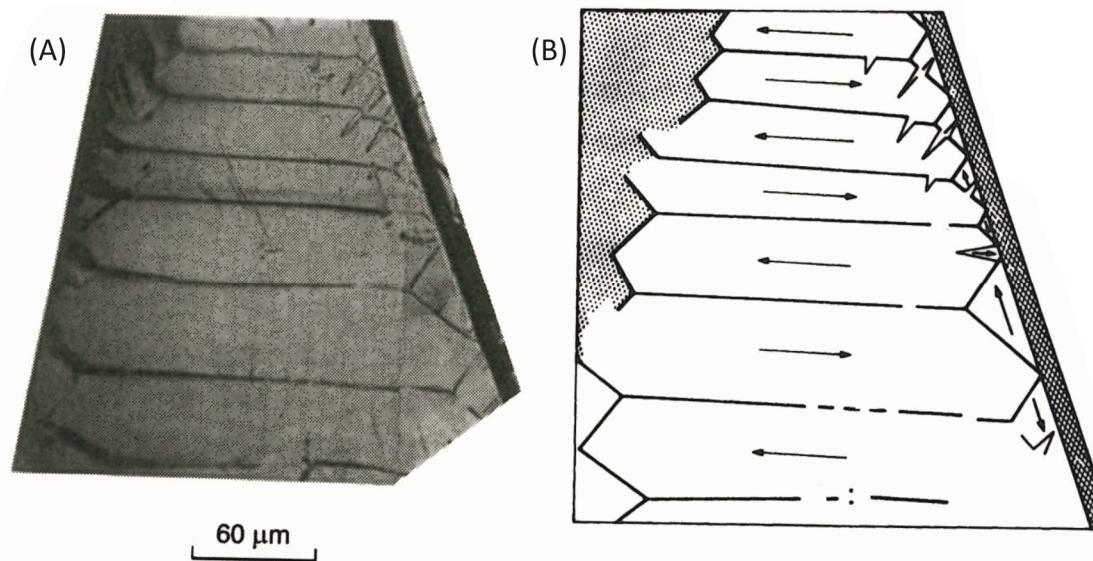
Für VFTB-Messungen wurden nur unbehandelte, möglichst frische Proben genommen. Dabei wurde auf Extraktionen magnetischer Partikel, wie sie z. B. bei Dobeneck et al. (1987) beschrieben werden, verzichtet. Stattdessen wurden nur die in den Untersuchungsgebieten jeweils magnetisch auffälligsten Proben ( $\kappa > 200 \text{ SI}^{-6}$  bzw.  $\chi \geq 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ) für Messungen in Plaggeneschen herangezogen (nach Dearing (1999 und 1996)). Am Karlsgraben wurden nur die offensichtlich Anomalie-erzeugenden Lagen für VFTB-Messungen herangezogen. So konnte gewährleistet werden, dass genügend magnetisches Material pro Volumeneinheit in der Probe vorhanden war um Magnetisierungsmessungen durchzuführen.

Vom VFTB wird die Magnetisierung (M) der Proben in der Einheit  $\text{Am}^2/\text{kg}$  (Amperequadratmeter pro Kilogramm) und die magnetische Flussdichte (B) in mT ausgegeben. Die Messprinzipien und die einzelnen Komponenten des VFTB werden bei Krása et al. (2007) unter Zuhilfenahme übersichtlicher Systemkomponenten- und Schaltpläne sehr ausführlich und verständlich beschrieben. Weitere Beschreibungen ähnlicher Messapparaturen findet man bei Collinson (1983) und Soffel (1991).

Vor der Messung im VFTB wird die Probe abgewogen, in einen diamagnetischen Quarzprobenhalter verfüllt, vorsichtig im Differentialtransformer (LVDT) (Anhang B) des VFTB platziert und befestigt. Ab diesem Moment wird die Messapparatur über das Interface des VFTB-Rechners angesteuert. Der VFTB fährt die Substratprobe automatisch in das Innere der Messapparatur. Sie wird mittig zwischen die Gradient- und Kompensationspulen zweier starker Elektromagnete platziert, wo Hysterese-, ‚Backfield‘- und zuletzt auch thermomagnetische Messungen durchgeführt werden. Um zu verstehen, was bei diesen Messungen im VFTB passiert, müssen in den nächsten Absätzen einige, bereits angerissene, gesteinsmagnetische Grundlagen tiefer beleuchtet werden.

Die magnetische Übernahmefähigkeit bzw. Volumenssuszeptibilität entscheidet wie stark der Boden oder das Sediment in einem Magnetfeld magnetisiert werden können (s. Kap. 2.1.1.1). Substrate, die diamagnetisches oder paramagnetisches Verhalten zeigen, also sehr schwache und negative VS, verlieren ihre induzierte Magnetisierung nach dem Ausbleiben eines äußeren Magnetfeldes (Evans & Heller 2003). Böden und Sedimente mit moderater und hoher Suszeptibilität, also mit antiferro- und

ferro(i)magnetischem Verhalten, reagieren anders. Nach dem Abschalten eines Magnetfeldes verharren die meisten ihrer Elementarmagnete in paralleler Ausrichtung zur Ausrichtung der zuletzt verlaufenden Magnetfeldlinien. Dieser übrig gebliebene Teil der Magnetisierung wird Remanenz genannt (Schmitt 2015; Evans & Heller 2003). Träger der Remanenz in (Ausgangs-) Gesteinen, Sedimenten und Böden sind die, bereits mehrfach erwähnten, magnetischen Eisenverbindungen (im Folgenden auch als Remanzträger bezeichnet) (Dunlop & Özdemir 1997; Evans & Heller 2003; Dearing 1999; Faßbinder 1994).



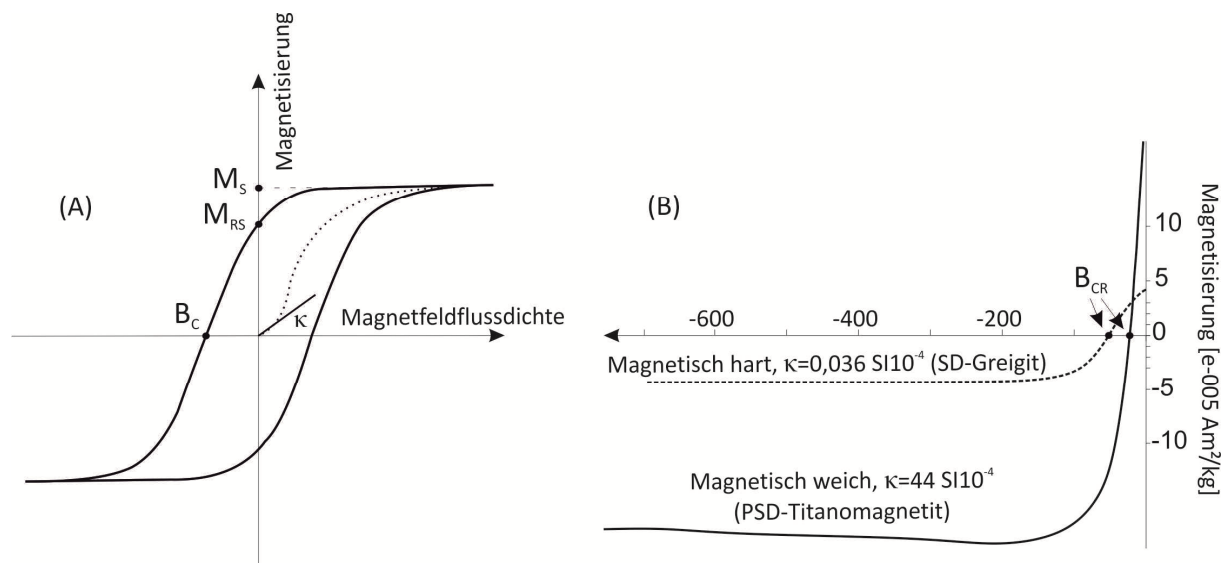
**Abbildung 2.4: Mikroskop-Aufnahme (A) und schematische Zeichnung (B) der Mikroskop-Aufnahme eines großen, natürlichen Magnetit-Mehrbereichsteilchens (MD). Deutlich zu erkennen sind die Domänenwände zwischen den einzelnen Domänen mit unterschiedlicher Magnetisierungsrichtung (Pfeile in der Zeichnung (B)) (nach Özdemir & Dunlop (1993) aus Dunlop & Özdemir (1997: 4, verändert)).**

Die für die Magnetisierung verantwortlichen Elementarmagnete der Remanenzträger sind in Bezirken gleicher Magnetisierungsrichtung zusammengeballt (Schmitt 2015). Diese Bezirke, auch als magnetische Domänen (*magnetic domains* nach Dunlop & Özdemir (1997: 3) und Evans & Heller (2003: 14)) bezeichnet, sind in größeren ferro(i)magnetischen Körnern von Domänenwänden (*domain walls* aus Dunlop & Özdemir (1997: 4) nach Özdemir und Dunlop (1993) und Evans & Heller (2003: 15)) umschlossen und von anderen Domänen abgetrennt (Abb. 2.4). Dabei sind die Domänen keinesfalls als starre Gebilde zu betrachten. Sie sind instabil und können bei starken Erschütterungen, sehr starken Magnetfeldveränderungen und hohen Temperaturen aufbrechen und sich neu formieren (Dunlop & Özdemir 1997; Evans & Heller 2003; Thompson & Oldfield 1986).

Die Größe und Anzahl der magnetischen Domänen hängt von der Korngröße des Remanenzträgers ab. Man unterscheidet nach Day et al. (1977) und Dunlop (2002a) zwischen (sortiert nach zunehmender Korngröße, s. a. Abb. 2.3):

- Superparamagneten (SP)
- ‚single domain‘-Teilchen/Status (SD) (auch Einbereichsteilchen genannt)
- ‚pseudosingle domain‘-Status (PSD) (meist Mischungen aus SP, SD und MD)
- ‚multi domain‘-Teilchen/Status (MD) (auch als Mehrbereichsteilchen bezeichnet)

Setzt man nun eine Probe mit Remanenzträger im VFTB bei gleichbleibender Temperatur (isothermal) wachsenden, abnehmenden und richtungswechselnden (variablen) magnetischen Induktionen aus, zeigt jeder Domänenstatus für sich typische Effekte. Diese Effekte finden in drei Schlüsselpunkten und in Form einer Hystereseschleife (Evans & Heller 2003: 14; Tauxe et al. 1996; Tauxe et al. 2002) sowie im Verlauf und Form einer Koerzitivkraftkurve (Faßbinder 1994: 103) ihren Ausdruck. Am besten lassen sich diese Schlüsselemente anhand modellhafter Hysteresese- und Koerzitivkraftkurven darstellen (Abb. 2.5).



**Abbildung 2.5: (A) Modellhafte Hystereseschleife (SD-Form) mit den wichtigsten Schlüsselpunkten (aus Evans & Heller 2003, 14, modifiziert) und (B) Koerzitivkraftkurven magnetisch weicher und harter Remanenzträger mit unterschiedlichen Volumenssuszeptibilitäten und unterschiedlichem Domänenstatus.**

Die bei Raumtemperatur vom VFTB gemessene Hystereseschleife (Abb. 2.5 (A)) fängt mit der initialen, umkehrbaren Suszeptibilität (Evans & Heller 2003; Linford 2003) an und erreicht mit steigender Flussdichte des angelegten Magnetfeldes (x-Achse) den ersten Schlüsselpunkt: die Sättigungsmagnetisierung  $M_s$ . Dies ist der Punkt, an dem die Probe nicht mehr weiter magnetisiert werden kann, sie ist magnetisch gesättigt. Beim Erreichen der  $M_s$  zeigen fast alle Domänen des Remanenzträgers in die Richtung des angelegten Magnetfeldes. Nach dem Abschalten des Magnetfeldes fällt die Magneti-

sierung der Probe nicht mehr auf die initiale Suszeptibilität zurück, sondern geht aufgrund bleibender Remanenz nur verzögert herunter (Evans & Heller 2003). So dass im Nullfeld der zweite wichtige Schlüsselpunkt der Hystereseschleife erreicht wird: die Sättigungsremanenz  $M_{RS}$ . Der Abstand zwischen diesem Wert und der Initialsuszeptibilität zeigt, wieviel von der Magnetisierung in den Elementarmagneten der Probe nach dem Abschalten des Magnetfeldes übrig bleibt: So wird die Remanenz definiert. Mit dem Anlegen eines entgegengesetzten Magnetfeldes und dem Fallen der Gesamtmagnetisierung auf Null wird der dritte Schlüsselpunkt erreicht: Die Koerzitivkraft  $B_C$ , diejenige magnetische Kraft bzw. Induktion, die zur Entmagnetisierung der Probe gebraucht wird. Dieser Punkt kennzeichnet jedoch noch nicht den Nullfeldpunkt der Sättigungsremanenz  $M_{RS}$ . Um diesen Schlüsselpunkt, der Remanenzkoerzitivkraft  $B_{CR}$  genannt wird, zu ermitteln, benötigt man neben einer Hystereseschleife eine Koerzitivkraftkurve (auch ‚*Backfield*‘-Kurve genannt (Abb. 2.5 (B))). Bei der Messung der Remanenzkoerzitivkraft im VFTB wird die Probe isothermal einem negativen bzw. entgegengesetzten Magnetfeld ausgesetzt und dabei die verbleibende Remanenz gemessen. Der Wert, an dem die ‚*Backfield*‘-Kurve die Nullmagnetisierung durchschreitet, kennzeichnet die Remanenzkoerzitivkraft  $B_{CR}$  (Faßbinder 1994; Evans & Heller 2003).

Die beschriebenen Schlüsselpunkte  $M_S$ ,  $M_{RS}$ ,  $B_C$  und  $B_{CR}$  sowie die Formen und Beschaffenheiten der Hysterese- und Koerzitivkraftkurven werden in der Umweltmagnetik neben der Bestimmung magnetischer Ordnung auch zur magnetomineralogischen Differenzierung herangezogen. Den größten Nutzen liefern die Hysterese- und ‚*Backfield*‘-Messungen jedoch für eine verlässliche Korngrößendifferenzierung der Remanenzträger in einer Probe (Faßbinder 1994; Wasilewski 1973; Tauxe et al. 1996). Die Verhältnissbildungen aus  $M_{RS}/M_S$  und aus  $B_{CR}/B_C$  stellen, gegeneinander geplottet, einen Day-Plot dar (Day et al. 1977), der als eine Art Korngrößendiagramm (richtiger: Domänenstatusdiagramm) für magnetische Remanenzträger verstanden werden kann (nach Dunlop (2002a und 2002b)) (Anhang C; Abb. 4.11 und Abb. 4.15 (H)). Obwohl der Day-Plot von einigen Autoren auch für FeS-Remanenzträger genutzt wird, wie z. B. von Roberts et al. (2011) für Greigit, muss hier unbedingt beachtet und erwähnt werden, dass der von Day et al. (1977), Dunlop (2002a) und Dunlop (2002b) theoretisch begründete und entwickelte Day-Plot auf experimentellen Daten der FeO-Remanenzträger Magnetit und Titanomagnetit basiert. Anders als beim o. g. Beispiel von Roberts et al. (2011), aber auch in den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit (Abb. 4.11, 4.15 (H), 4.17) suggeriert wird, existieren für magnetische Eisensulfide gegenwärtig keine theoretisch begründeten Domänenstatusabbildungen (mdl. Mitt. J. Faßbinder (2014)).

### **2.1.2 Ermittlung magnetischer Minerale aus thermomagnetischen Messungen**

Bei thermomagnetischen Messungen bzw. bei der Messung der Temperaturabhängigkeit der Magnetisierung wird die Probe im VFTB bei ungleichmäßig-oszillierendem Magnetfeld (Krasa et al. 2007) von der Raumtemperatur bis auf die Temperatur von 700°C erhitzt und nach der Erhitzung wieder auf Raumtemperatur abgekühlt. Sowohl bei der Erhitzung, als auch bei der Abkühlung wird subsequent die Magnetisierung (in Am<sup>2</sup>/kg) der Probe gemessen, so dass nach der Messung zwei Magnetisierung/Temperatur-Kurven (M/T-Kurven) entstehen: eine Aufheizkurve und eine Kühlkurve. Die M/T Aufheiz- und Kühlkurven eignen sich zur Bestimmung der Curie-Temperatur  $T_C$  (Soffel 1991; Hanesch et al. 2006; Moskowitz 1981). Als Curie-Temperaturen werden kristallographische und/oder physikalische Phasenübergänge bezeichnet (Krasa et al. 2007). Diese sind für die jeweiligen magnetischen Remanenzträger, aber auch magnetische Mineralkompositionen typisch (nach Dunlop & Özdemir (1997)). Die Curie-Temperatur ( $T_C$ ) wird im RockMagAnalyser automatisch unter Verwendung der Moskowitz (1981) und/oder der 2. Ableitung-Methode berechnet (Moskowitz 1981; Leonhardt 2006). Mit der Messung der Temperaturabhängigkeit der Magnetisierung werden in vorliegender Arbeit die Magnetominerale bzw. die Remanenzträger einer Probe bestimmt.

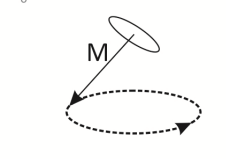
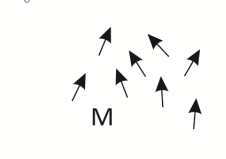
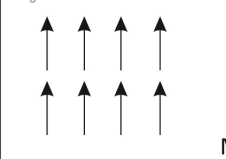
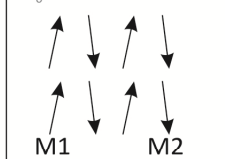
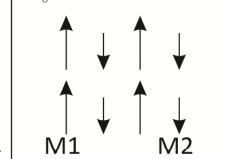
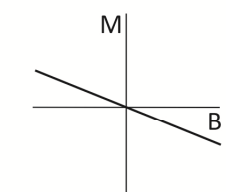
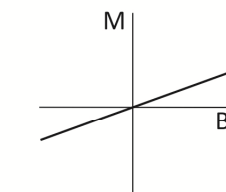
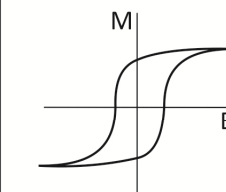
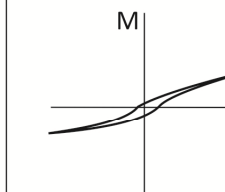
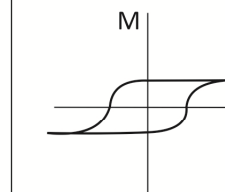
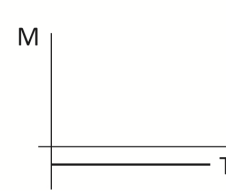
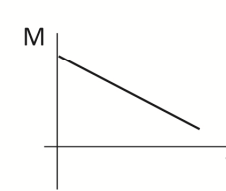
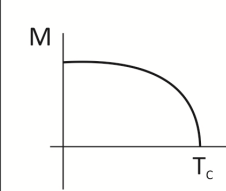
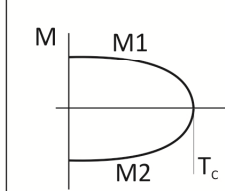
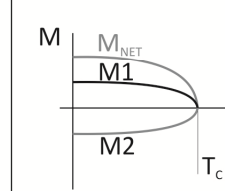
Die Temperaturabhängigkeit der Magnetisierung wird ausführlich bei Soffel (1991), Collinson (1983) und Remanenzträger-spezifisch bei Dunlop & Özdemir (1997) beschrieben.

### **2.1.3 Zusammenschau umweltmagnetischer Methoden im Hinblick auf den Nachweis magnetischer Remanenzträger in Umweltarchiven**

Die Tabelle 2.2 und folgende Ausführungen stellen einen Versuch dar, die in vorangegangenen Kapiteln dargestellten, umweltmagnetischen Grundlagen und Methoden vereinfacht zu veranschaulichen und kurz zusammenzufassen.

Umweltmaterialien zeigen unterschiedliches magnetisches Verhalten. Sie werden in diamagnetische Materialien mit einer dem Magnetfeld entgegen gerichteten Magnetisierung, in paramagnetische Materialien mit einer ungerichteten Vorzugsrichtung, in antiferromagnetischen Materialien mit parallelen Elementarmagneten bei Abwesenheit eines Magnetfeldes und mit verkanteten magnetischen Momenten im Feld sowie in ferro(i)magnetische Materialien mit parallel zu Magnetfeldlinien polarisierten bzw. magnetisierten Elementarmagneten klassifiziert.

Tabelle 2.2: Überblick über unterschiedliche Arten des Magnetismus (nach Hilzinger & Rodewald (2013: 43, modifiziert)). 1. Zeile: Volumenssuszeptibilität der jeweiligen magnetischen Ordnung als Kennwert für die Übernahmefähigkeit/Magnetisierbarkeit der Materie im Magnetfeld (Dearing 1999; Scharlau et al. 2003). 2. Zeile: stark schematisierte Anordnung magnetischer Momente (schwarze Pfeile) (Dunlop & Özdemir 1997) innerhalb eines gerichteten Magnetfeldes (graue Pfeile mit offener Spitze) (nach Schmitt (2015)) für die jeweilige Magnetismus-Art. 3. Zeile: Abhängigkeit der Magnetisierung von der Magnetfeldflussdichte. 4. Zeile: Abhängigkeit der Magnetisierung von der Temperatur.

	Diamagnetismus	Paramagnetismus	Ferromagnetismus	(verkanteter) Antiferromagnetismus	Ferrimagnetismus
Übernahmefähigkeit der Materie für Magnetfelder (Volumenssuszeptibilität bei Raumtemperatur)	schwache Übernahmefähigkeit bzw. Magnetfelder werden abgestoßen ( $\kappa < 0$ )	schwache Übernahmefähigkeit ( $\kappa > 0$ )	sehr starke Übernahmefähigkeit ( $\kappa \gg 0$ )	moderate Übernahmefähigkeit ( $\kappa > 0$ )	starke Übernahmefähigkeit ( $\kappa \gg 0$ )
schematische Anordnung magnetischer Momente im Magnetfeld $H_0 \uparrow$ (M=Magnetisierung, M1=M im 1. Untergitter, M2=M im 2. Untergitter, $M_{NET}$ =Nettomagnetisierung)					
typische Abhängigkeit der Magnetisierung (M) von der Magnetfeldflussdichte (B)					
typische Abhängigkeit der Magnetisierung (M) von der Temperatur (T) ( $T_c$ =Curie-Temperatur)					

Der Suszeptibilitätsparameter  $\kappa$ , der u. U. bereits in-situ gemessen werden kann, gibt erste Hinweise auf magnetisches Verhalten von Substraten in Umweltarchiven. Weitere Labor-Suszeptibilitätsparameter lassen verlässliche Aussagen bezüglich Gesamtkonzentration und Gesamtmasse ( $\chi$ ) magnetischer Partikel in der Probe treffen. Die FMS ( $\chi_{fd}$  bzw.  $\chi_{fd\%}$ ) gilt als wichtigster und verlässlichster Kennwert zur Abschätzung feinsten, superparamagnetischer Partikel (mdl. Mitt. J. Faßbinder (2015)).

Das Anlegen unterschiedlicher Feldkonfigurationen und Feldfrequenzen an eine Substratprobe im VFTB erlaubt anhand der Schlüsselpunkte aus Hysterese- und Koerzitivkraftmessungen, und gepaart mit den Ergebnissen aus der FMS, eine gute Abschätzung des gesamten magnetisierbaren Korngrößenspektrums. Die Formenausprägungen der Hysterese- und ‚Backfield‘-Kurven geben außerdem erste Hinweise auf die dominante magnetische Mineralphase in der Probe. Sie liefern letztlich auch verlässliche Aussagen über die magnetische Ordnung bzw. über das magnetische Verhalten der gemessenen Probe. Aus thermomagnetischen Messungen lassen sich schließlich dominante Remanenzträger sowie die magnetomineralogische Zusammensetzung der Probe ableiten (Tab. 2.2).

**Tabelle 2.3: Wertespannen von massenspezifischen Suszeptibilitäten (aus Peters und Dekkers (2003) und Dearing (1999)), Domänenstruktur- bzw. Korngrößenabbildenden Ratios ( $M_{RS}/M_S$  und  $B_{CR}/B_C$  aus Peters und Dekkers (2003)) und Curie-Temperaturen ( $T_C$  aus Dunlop & Özdemir (1997)) ausgewählter Remanenzträger. \*Genauere Curie-Temperaturen liegen für Greigite gegenwärtig nicht vor (nach Roberts et al. (2011)).**

	Magnetit $Fe_3O_4$	Titano- magnetit $xFe_2TiO_4 \cdot (1-x) \cdot Fe_3O_4$	Maghemit $\gamma-Fe_2O_3$	Greigit $Fe_3S_4$	Goethit $\alpha-FeOOH$	Hämatit $\alpha-Fe_2O_3$
<b>Magnetische Ordnung</b>	ferri-magnetisch	ferri-magnetisch	ferri-magnetisch	ferri-magnetisch	verkantet antiferromagnetisch	verkantet antiferromagnetisch
<b><math>\chi</math> (<math>10^{-6} m^3 kg^{-1}</math>) (min.-&gt;max.)</b>	285 -> 1233	46 -> 806	283 -> 845	26 -> 194	0,35 -> 5,92	0,13 -> 3,83
<b><math>M_{RS}/M_S</math> (min.-&gt;max.)</b>	0,0005 -> 0,4	0,01 -> 0,53	0,12 -> 0,16	0,18 -> 0,69	0,06 -> 1,0	0,43 -> 0,85
<b><math>B_{CR}/B_C</math> (min.-&gt;max.)</b>	1,4 -> 65	1,2 -> 6,9	2,54 -> 2,67	1,21 -> 5,09	2,5 -> 66,7	1,28 -> 2,19
<b><math>T_C</math></b>	580	150	590-675	~330*	120	675

In der Tabelle 2.3 sind Wertespannen massen- und korngrößenabbildender Ratios sowie die mineralbestimmenden Curie-Temperaturen für ausgewählte, umweltmagnetische Minerale aus der Literatur abgetragen. Neben den ferrimagnetischen Remanenzträgern sind auch 2 Antiferromagnetika dargestellt. Diese gelten zwar nicht immer als eigenständige Träger der Magnetisierung in archäologischen Befunden (v. a. nicht Goethit) (nach Fassbinder & Bondar (2013)). Sie sind dennoch von Bedeutung, weil sie unter Umständen Einfluss auf die Suszeptibilitätsparameter haben (nach Till et al. (2015)), mit den Ferrimagnetika in natürlichen Substraten vergesellschaftet und/oder gar als Erhitzungsprodukte

der Ferrimagnetika auftreten können (Fassbinder & Bondar 2013). Die Tabelle verdeutlicht weiterhin, dass die Remanenzträger untereinander teils ähnliche Domänenstruktur-Ratios aufweisen, denn sie kommen auch in ähnlichen oder gleichen Korngrößen in natürlichen Substraten vor. Beim Parameter  $\chi$  werden bereits Unterschiede deutlich. Die Curie-Temperaturen zeigen letztlich deutliche, mineral- und materialabhängige Unterschiede.

All die genannten Unterschiede und Gemeinsamkeiten in den Eigenschaften magnetischer Minerale sind ein Glücksfall für die angewandte Umweltmagnetik und die Magnetometrie, denn damit ergibt sich die Möglichkeit die für Anomalien in Magnetometerdaten verantwortlichen Magnetminerale in Böden und Sedimenten zu lokalisieren und magnetisch zu charakterisieren. Aus dieser Charakterisierung ergeben sich schließlich Indizien und Denkansätze für die Genese und Anreicherungsprozesse von Magnetomineralen in den Umweltarchiven. Was schließlich auch zum besseren Verständnis von Magnetfeldanomalien und ihrer Entstehung führt.

Folgende Ausführungen behandeln die Magnetometerprospektion, das Potentialverfahren, das erlaubt die oben besprochenen Remanenzträger und ihre Konzentrationen im Boden und Sediment über das Magnetfeld zu erfassen und zu kartieren.

## **2.2 Grundlagen und Methode der Magnetometerprospektion**

### **2.2.1 Eingesetzter Magnetometer und messtechnischer Hintergrund**

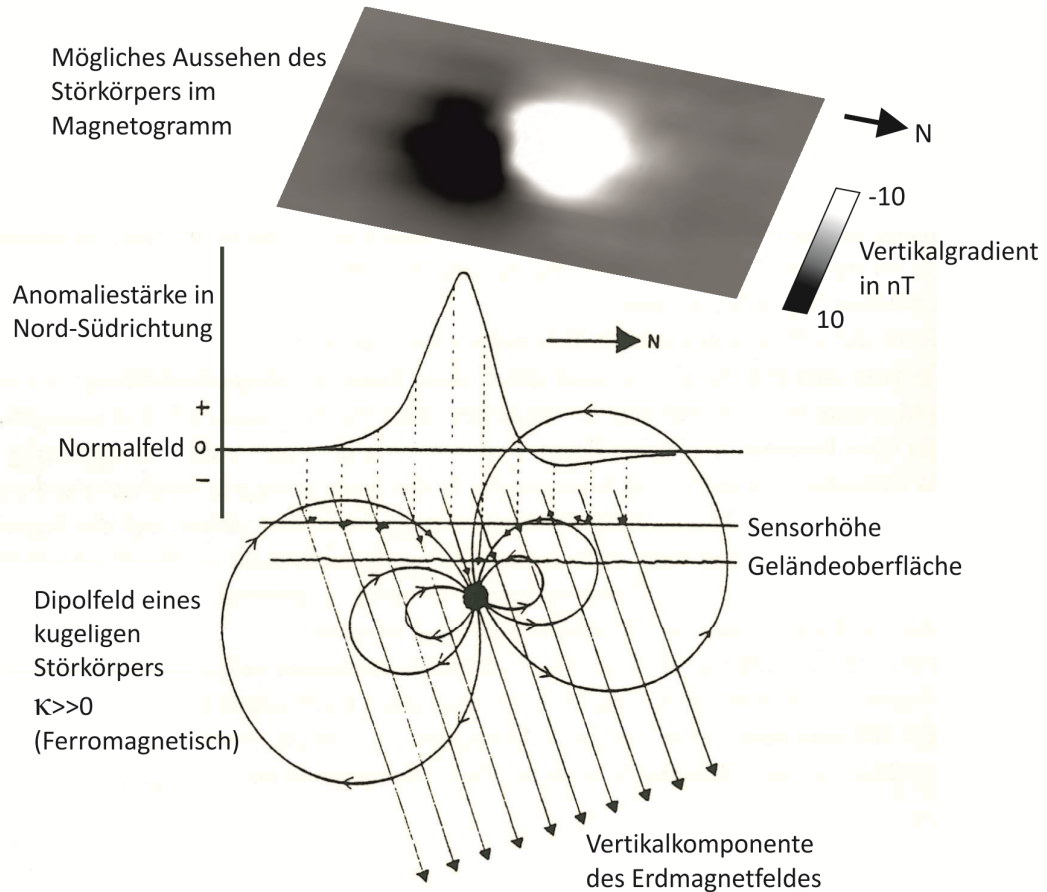
Anders als die im Vorfeld besprochenen umweltmagnetischen bzw. gesteinsmagnetischen Verfahren, die zu den in-situ-Methoden der angewandten Geophysik gezählt werden können, wird die Magnetometerprospektion den bildgebenden Potentialverfahren zugeordnet. Als magnetisches Prospektionsverfahren wird in vorliegender Arbeit die Fluxgate Gradiometrie/Magnetometrie angewandt. Neben den SQUID-Magnetometern gehören Fluxgate-Gradiometer zu den Vektor-Magnetometern die das Erdmagnetfeld als Komponente eines Feldes in Richtung der Sensorachse messen (Faßbinder 2008). Die Vektor-Magnetometer haben sich durch ausreichende Sensibilität und einfache Handhabung bei archäologischen Prospektionen bewährt (Linford et al. 2007; Gaffney 2008).

Das eingesetzte Fluxgate Gradiometer Bartington Grad 601 dual (im Folgenden auch GRAD, Gradiometer, Fluxgate oder Magnetometer) besteht aus 2 hochstabilen Sensoren in Gradientenordnung (Bartington & Chapman 2004; Bartington Instruments Ltd. 2016b). Seine Fluxgate-Sonden erfassen den Vertikalgradienten des Erdmagnetfeldes. Auch deshalb wird das Verfahren Gradiometrie genannt.

Vor einer Messung wird der Gradiometer im Messgebiet auf das ungestörte Erdmagnetfeld kalibriert. Diese magnetisch ruhige Stelle (Normalfeld) wird mit dem Scanmodus des GRAD ermittelt. Ferro(i)magnetische Störkörper im Untergrund erzeugen, aufgrund ihrer hohen Übernahmefähigkeit für



magnetische Felder, eigene Magnetfelder, die das Normalfeld stören. Diese Störungen des Normalfeldes verändern den Einfallswinkel der Flussdichte der Vertikalkomponenten und ändern somit auch den Gradienten des Vertikalfeldes was sich im Magnetogramm – einer magnetischen Karte eines Geländeabschnitts – als eine magnetische Anomalie niederschlägt (Abb. 2.6).



**Abbildung 2.6: Magnetfeldanomalie eines ferromagnetischen, kugeligen Störkörpers im Profil (unten) (aus Zickgraf (1999: 109, modifiziert)) und sein mögliches Aussehen in einem Magnetogramm (oben).**

Magnetfeldanomalien werden vom Magnetometer in der Einheit nT (nano Tesla) erfasst. Dabei kann das GRAD magnetische Anomalien mit einer maximalen Auflösung von 0,03 nT/m detektieren (Bartington & Chapman 2004; Bartington Instruments Ltd. 2016b). Um diese Messauflösung zu erreichen, muss der Daten-Bereich des Magnetometers auf  $\pm 100$  nT begrenzt werden. D. h. die Anomalien werden nur in diesem Messwertebereich gemessen und sind nicht unendlich stark oder schwach. Außerdem müssen für die höchste Auflösung die Einstellungen des GRAD so gewählt werden, dass es Abweichungen der Vertikalkomponente mit einer räumlichen Auflösung von 4 Messungen pro Meter und einem Traversenabstand von 0,5 m erfasst (Bartington Instruments Ltd. 2016b).

Die Größe der Messflächen für die Magnetometrie wurde, je nach zu prospektierender Fläche, meist auf 40 X 40 m, manchmal auf 20 X 20 m und selten auf 10 X 10 m gesetzt. Die räumliche Einmessung

der Eckpunkte dieser Messgrids erfolgte meistens durch einen Vermessungstechniker, seltener wurde zur Vermessung eine eigens bediente Totalstation (RTK/dGPS) genutzt. Nicht-magnetische Holzpflocke dienten dabei als Markierung der Eckpunkte.

Während der Gradiometer-Messung wird jedes Messgrid mit dem GRAD im zig-zag-Muster systematisch abgelaufen. Führungsschnüre aus Nylon mit Abstandsmarkierung (1 m) und ein akustisches Intervall-Signal des Gerätes dienen beim Ablaufen der einzelnen Traversen als Orientierung.

Hindernisse und Störkörper (z. B. Baumgruppen, Hinweistafeln, Laternenpfosten usw.) wurden, falls nötig, umgangen und die fehlenden Messwerte im GRAD durch Dummy-Werte ersetzt.

Die im Magnetometer erfassten Daten wurden zur Mitte und zum Ende eines Messtages im Gelände ausgelesen und auf einem mobilen Rechner gespeichert. Die SNUFFLER-Software ermöglichte dabei einen schnellen Überblick und eine vor-Ort-Kontrolle der erhobenen Magnetometrie-Daten (Sussexarch 2015).

### 2.2.2 Verarbeitung von Magnetometerdaten

Bei der Auswertung der Magnetogramme gilt es einige Besonderheiten zu beachten. So verursachen Störquellen (z. B. massive Eisenobjekte) eine extreme Ablenkung des magnetischen Flusses und somit eine unverhältnismäßig große Anzahl von Extremwerten. Sie werden von Magnetometern miterfasst und in das Magnetogramm eingebaut. Das führt wiederum zu einem Ungleichgewicht in der Häufigkeitsverteilung der Rohdaten. Normalerweise sollten der Modus und der Mittelwert der Messdaten – der Kalibration des Gerätes entsprechend – im Bereich von 0 nT liegen. Eine große Häufigkeit extremer Werte bewirkt jedoch, dass das auf die Bandbreite der Messungen (-100 bis +100 nT) gestreckte Magnetogramm sehr kontrastarm wirkt. Um die Rohdaten entsprechend zu korrigieren, werden bei einigen Messungen die Extremwerte aus dem Bereich massiver Störquellen in den Rohdaten durch Dummy-Werte ersetzt. Im Anhang D ist, als Beispiel für den o. g. Verarbeitungsprozess, ein unbearbeitetes Magnetogramm aus Rohdaten und das um die Extremwerte bereinigte Magnetogramm gegenübergestellt.

Weitere Bearbeitungsschritte erfolgen auf der Basis der bereinigten Rohdaten in der Geoplot-Software. Einzelne Traversen können hier zueinander verschoben werden, um geringe räumliche Ungenauigkeiten bei der Datenerfassung auszugleichen („Destagging“). Eine statistische Angleichung der einzelnen Traversen glättet die Magnetogramme („Zero mean traverse“). Eine Interpolation bringt die Messkacheln von ihrer rechteckigen (0,25 x 0,5 m) auf eine quadratische (0,25x0,25 m) Form (Geoscan Research 2005). Dadurch lassen sich die Daten im GIS darstellen und weiter analysieren.

Dargestellt werden die Gradiometerdaten bzw. die Magnetogramme im GIS und auf den Interpretationsplänen in Form binärer Raster. Dabei wird der Daten-Range der Magnetogramm-Raster zur besseren Visualisierung auf 2 bzw. 1 Standardabweichungen gestreckt.

### 2.2.3 Interpretation von Magnetogrammen

Nach Soffel (1991) besitzen alle, nach Dunlop & Özdemir (1997) fast alle Gesteinstypen, und damit auch fast alle archäologischen Böden (Fassbinder 2015) und Sedimente eine remanente Magnetisierung. Die unterschiedlichen Arten der remanenten Magnetisierung werden unter dem Oberbegriff natürliche remanente Magnetisierung NRM zusammengefasst. Aus den Ausführungen im Kap 2.2.1 kann abgeleitet werden, dass das Erdmagnetfeld an jeder archäologischen Stätte und in jedem Umweltarchiv eine induzierte Magnetisierung hervorruft. Die ferro(i)magnetischen Materialien tragen neben der induzierten zusätzlich noch eine remanente Magnetisierung, die, wie die unten aufgeführten Beispiele zeigen werden, nicht unbedingt in Richtung des rezenten Erdmagnetfeldes ausgerichtet sein muss. Für die Interpretation von Magnetogrammen ist ein tieferes Verständnis der NRM genauso wichtig, wie die Kenntnis magnetomineralogischer Eigenschaften betrachteter Umweltarchive (Fassbinder & Bondar 2013).

Die NRM kann von magnetischen Materialien auf unterschiedliche Weise erworben werden. Nach Fassbinder (2015) sind in archäologischen Kontexten vier fundamentale Erwerbsprozesse relevant. Bezugnehmend auf Soffel (1991), Dunlop & Özdemir (1997) und Fassbinder (2015) werden diese Prozesse im Folgenden aufgelistet und beschrieben:

- a) Thermoremanente Magnetisierung (TRM) gilt als die wichtigste Form der NRM sowohl für den Paläomagnetismus und Archäomagnetismus als auch für die Magnetometerprospektion. Sie wird von Umweltmaterialien erworben, wenn sie auf Temperaturen über ihre Curie-Temperatur erhitzt und unter die Curie-Temperatur wieder abgekühlt werden. Während der Abkühlung werden die Spinnmomente parallel zum vorherrschenden Magnetfeld ausgerichtet. Die durch intensive Anomalien in Magnetogrammen auftretende TRM wird oft von Tonbrennöfen, Feuerstellen und Metallproduktionsstätten erzeugt.
- b) Sedimentationsremanenz, auch als detritische Remanenz (DRM) bekannt, wird von kleinen ferro(i)magnetischen Teilchen bei Sedimentation in ruhigem Wasser, im Erdmagnetfeld erworben. Die Teilchen regeln sich dabei selbst in eine Position niedrigster Energie ein, so dass ihre magnetischen Momente parallel zum Erdmagnetfeld liegen. Dabei kann es vorkommen, dass sich die ganz kleinen SD-Partikel erst viel später, z. B. durch diagenetische Verfestigung, in der Sedimentsäule einregeln. In solch einem Fall spricht man von der Postsedimentations-

remanenz (PDRM). In Magnetogrammen erzeugt die DRM und PDRM sehr schwache, positive magnetische Anomalien und deutet oft auf Gruben, Gräben und Senken.

- c) Chemische Remanenz (CRM) erwerben die magnetischen Minerale in Böden und Sedimenten beim wachsen. Ihre volle Ausbildung findet diese Remanenzform beim Übergang vom SD- in den PSD-Domänenstatus. Als kleine Einbereichsteilchen sind magnetische Partikel willkürlich im Substrat angeordnet und thermalen Fluktuationen unterworfen (Superparamagnetismus). Wenn jedoch die Partikel größer werden und den o. g. Übergang überschreiten, übertreffen deren magnetostatische Kräfte die Thermalfluktuation und erzeugen eine chemisch-remanente Magnetisierung. In den Magnetogrammen erzeugt die CRM, ähnlich wie DRM und PDDRM, schwache, positive Anomalien.
- d) Blitzschlaginduzierte Remanenz (LIRM) ist sehr leicht anhand ihrer sternförmigen, intensiven Anomalien in den Magnetogrammen zu erkennen. Sie wird während des Blitzeinschlags bei ähnlichen Verhältnissen, wie die TRM erworben. Ein deutlicher Unterschied zur TRM besteht jedoch darin, dass die magnetischen Momente der Umweltmaterialien nicht nach dem Erdmagnetfeld ausgerichtet werden, sondern nach der Energieabflussrichtung des Blitzeinschlags. Soffel (1991) bezeichnet dieses Phänomen „Aussteuerung bis zur Sättigung“ (Soffel 1991: 99).

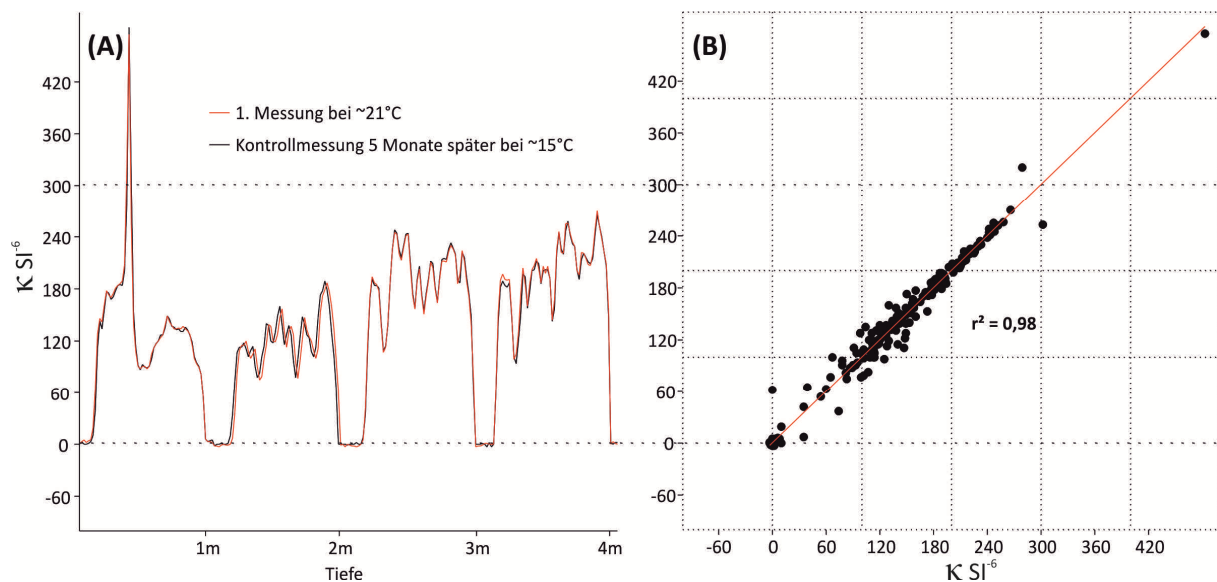
Zum Abschluss der Vorstellung umweltmagnetischer und magnetometrischer Grundlagen und Verfahren sei noch einmal zusammengefasst, dass es zur adäquaten Interpretation von Magnetogrammen nicht nur das Wissen o. g. NRM-Typen und die Kenntnis des eingesetzten Potentialverfahrens ausreicht. Für ein tieferes Verständnis der magnetischen Anomalien und deren Bezug zur geoarchäologischen Situation sind umweltmagnetische Analysen unabdingbar (Fassbinder 2015). Des weiteren ist für ein ganzheitliches Verständnis einer archäologischen Stätte natürlich auch die Kenntnis der bodenkundlich-sedimentologischen sowie die topographische Situation des Untersuchungsgebietes von großer Bedeutung. Deshalb werden im Folgenden, nach Ausführungen zur Qualitätssicherung umweltmagnetisch-magnetometrischer Verfahren, kurz bodenkundliche, sedimentologische und fernerkundliche Methoden vorgestellt, die in Kombination mit den umweltmagnetischen Verfahren in vorliegender Untersuchung angewandt wurden.

### **2.3 Qualitätssicherung umweltmagnetischer und magnetometrischer Messungen**

Bei der Erhebung umweltmagnetischer und magnetometrischer Daten wurden je nach Messmethode unterschiedliche Qualitätssicherungen durchgeführt. Alle Wiederholungs- und Mehrfachmessungen zielten dabei auf die Prüfung der Messdaten auf Reproduzierbarkeit.

Zur Qualitätssicherung der  $\kappa$ -Messungen im Feld (in-situ) mit dem MS2K-Sensor wurden die Bodenhorizonte und archäologische Straten, wie zum Beispiel in der Abbildung 4.5 dargestellt, mehrfach und an unterschiedlichen Stellen im Bodenprofil bzw. Grabungsprofil gemessen.

$\kappa$ -Messungen an Innenliner-Bohrkernen der Rammkernsonde mittels MS2C-Sensor bewiesen eine beeindruckende Reproduzierbarkeit im Rahmen qualitätssichernder Untersuchungen. Wie die Abbildung 2.7 zeigt, sind die Messwerte einer Wiederholungsmessung auch nach monatelanger Lagerung der Bohrkerne immer noch fast dieselben, wie bei der ersten Messung. Dies obwohl der Sensor bei der Kontrollmessung in einem ganz anderen Raum und bei niedrigeren Raumtemperaturen eingesetzt wurde. Hieraus lässt sich auch folgernd vermuten, dass Substrate, die in luftabgeschlossenen Innenliner-Kernen gelagert werden, keinen oder nur relativ geringen physikochemischen Veränderungen unterworfen sind.



**Abbildung 2.7:** (A) Zu unterschiedlichen Zeiten und bei unterschiedlichen Raumtemperaturen wiederholte  $\kappa$ -Messungen an 4 Innenliner-Bohrkernen vom Hangfuß des östlichen Kalkrieser Berges in Vorwalde bei Venne (zur Verortung s. Abb. 3.6). Die Bohrkerne beinhalten in oberen Bereichen schluffig-sandige Plaggenauflagen und Kolluvien, in mittleren Tiefenlagen z. T. tonige Sandlössе sowie grund- und stauwasserbeeinflusste Sande in tieferen Lagen. Zwischen den 1m-Bohrkernen wurden jeweils 5 Messungen ohne Kern im Sensor durchgeführt. (B) Lineare Regression (RMA-Methode nach Hammer (2015)) der beiden Messungen mit dem errechneten Korrelationskoeffizient.

Bei Messungen der frequenzabhängigen Suszeptibilitätsparameter ( $\kappa_{lf}$ ,  $\kappa_{hf}$ ) (Kap. 2.1.1.2) im Labor mittels MS2B wurden stets dreifache Messungen für den jeweiligen Parameter durchgeführt. Bei großen Streuungen ( $> 5 \text{ SI}^{-6}$ ) der Dreifachmessungen, die zumeist auf elektromagnetische Interferenzen zurückgeführt werden konnten, wurde der MS2B in eine elektromagnetisch-ruhigere Stelle im Raum gebracht und die Dreifachmessung wiederholt. Für die Kalkulation der MS und FMS wurden die Mittelwerte der Dreifachmessungen genutzt. Um Messfehler, die aus der Anisotropie der Suszepti-

bilität entstehen könnten zu vermeiden, wurden die Probenbehälter bei allen frequenzabhängigen Messungen in der selben Ausrichtung im MS2B platziert.

Die Qualitätssicherung der VFTB-Messungen erfolgte durch Doppelmessungen, dabei zeigten alle Kontrollmessungen im Hinblick auf den Domänenstatus und Magnetomineral-Ermittlung (M/T-Messungen und  $T_C$ -Berechnung) eine sehr hohe Reproduzierbarkeit der Messwerte.

Die Qualität und Reproduzierbarkeit der Magnetometermessungen konnte am Karlsgraben überprüft und bestätigt werden. Hier wurden gleiche Flächen (im nördlichen Bereich, s. dazu Abb. 4.12) mit unterschiedlichen Magnetometer-Systemen abgemessen, darunter auch mit einem Vektor-Gradiometer desselben Typs, wie der, der in der vorliegenden Untersuchung eingesetzt wird.

## **2.4 Aufschlussarten, Geländemessungen, Ansprache und Beprobung**

Bodenkundliche, sedimentologische und substratgenetische Ansprachen wurden an frischen Aufschlüssen, nach Vorgaben der aktuellsten Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ad-hoc-AG Boden 2005), vollzogen. So wird im Folgenden auch die der Ad-hoc-AG Boden (2005) entsprechende Nomenklatur (im Text durch [eckige Klammern] herausgehoben) genutzt. Wobei im Fall der braunen Plaggenesche, soweit möglich, den Horizontbezeichnungen immer ein modifiziertes, substratgenetisches Kurzzeichen hinzugefügt wird (nach Ad-hoc-AG Boden (2005: 137-138), Mengeling (1986) und Hinze (1979)).

Ansprachen, Beprobungen und Messungen an Plaggeneschen fanden immer in Aufgrabungen [G, GG, GS] statt. Bei Grabungen übernahmen die zuständigen, technischen Mitarbeiter der Archäologie die Ein- und Vermessung. Flache Grabungen und Schürfgruben wurden mit einem Hand-GPS eingemessen. Die in-situ-Volumenssuszeptibilität (mittels MS2K) wurde bereits im Rahmen der ersten Aufnahmen direkt an Bodenprofilen gemessen. Die Probennahme erfolgte horizont- bzw. stratenweise (Mischbeprobungen). Horizonte/Straten mit den höchsten  $\kappa$ -Werten (im Folgenden  $\kappa$ -Peaks oder Kappapeaks) wurden ggf. gesondert beprobt. Bei Horizontmächtigkeiten  $> 2$  dm wurden Teilproben entnommen.

Bei allen offenen Aufschlussarten wurden im Rahmen der Feldansprache der Kalkgehalt mittels 10%iger Salzsäure (HCl) und die Farbe mit dem Munsell-Farbsystem bestimmt (nach Ad-hoc-AG Boden (2005) und Munsell soil color charts (2000)).

Sedimentologisch-stratigraphische Ansprachen wurden am frischen Bohrgut aus Schlitzsonden einer Rammkernsonde [BR] durchgeführt (Leitholdt 2014). Rammkernbohrungen und dGPS-Vermessungen am Karlsgraben wurden durch die Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Christoph Zielhofer von der Uni-

versität Leipzig organisiert. Für umweltmagnetische Analysen wurden die in der Schlitzsonde angesprochenen Sedimentprofile mittels geschlossenen, diamagnetischen Rammkernsonden-Innenlinern als Parallelbohrung gewonnen und bis zum Messen der Volumenssuszeptibilität (Kap 2.1.1.1) geschlossen aufbewahrt. Ebenfalls geschlossen wurde die  $\kappa$ -Messung im MS2C vollzogen und die aufgetretenen Kappapeaks am Innen-liner markiert. Nach dem Aufschneiden der Innenliner wurden die Sedimente der markierten Bereiche für weitere umweltmagnetische Messungen (MS2B und VFTB) (Kap. 2.1.1.2 und 2.1.1.3) beprobt.

## 2.5 Ermittlung bodenkundlich-sedimentologischer Kennwerte im Labor

Neben den beschriebenen umweltmagnetischen Messungen wurden auch gängige bodenkundliche Laborkennwerte erhoben. Sie werden im Folgenden kurz dargestellt. Für Laboruntersuchungen wurden die Proben luftgetrocknet und homogenisiert. Jedoch nicht alle Laboranalysen, die in der vorliegenden Arbeit hinzugezogen werden, wurden vom Autor selbst durchgeführt. An Sedimenten im Untersuchungsgebiet Karlsgraben wurden Korngrößenanalysen, Bestimmung der Organischen Substanz und Klassifizierung der stark organischen Lagen an der Universität Leipzig in der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Christoph Zielhofer vollzogen und von Eva Leitholdt (2014) sehr ausführlich beschrieben. Die Laborkennwerte des Plaggeneschprofils am Lechtinger Esch wurden von Prof. Dr. Klaus Mueller zur Verfügung gestellt.

### 2.5.1 Glühverlust (LOI)

„*Loss-on-ignition*“ (im Folgenden auch LOI) manchmal auch „*ashing*“ (Bisutti et al. 2004) oder Glühverlust genannt, ist eine schnelle und einfache Methode zur Ermittlung des Gesamtkohlenstoffs (TC = „*total carbon*“) in Böden und Sedimenten. Dabei wird die Masse der Probe vor und nach dem Erhitzen in einem Muffelofen ermittelt. Die Theorie besagt, dass Kohlenstoff bei starker Erhitzung als CO<sub>2</sub> entweicht und so einen Massenverlust der Probe bewirkt. Dieser Massenverlust kann anschließend als TC betrachtet werden (Ball 1964; Howard & Howard 1990; Bisutti et al. 2004).

Die meisten publizierten Untersuchungen zeigen, dass sich die Trennung des TC in seine organischen (OC = „*organic carbon*“) und anorganischen (IC = „*inorganic carbon*“) Anteile unter Zuhilfenahme der LOI-Methode als schwierig erweist, weil sich die Verbrennungs- und Aufschlusstemperaturen überlagern (Boyle 2004; Bisutti et al. 2004). Dennoch zeigen thermogravimetrische Untersuchungen von Cuypers et al. (2002), Pallasser et al. (2013) und Siewert (2004), dass unter probenspezifischen, an Ton- und Kalkgehalten orientierten, Anpassungen angemessene Schätzungen des Humusgehaltes mit Hilfe des LOI möglich sind.

Ungenauigkeiten des LOI im Hinblick auf Massenverluste durch verdampfendes Kristallwasser in Tonmineralen (Ball et al. 1964) werden bei den Ergebnisinterpretationen berücksichtigt. Bei einem großen Teil der Proben (Proben vom Oberesch und aus dem Plaggensch an der Lechtinger Mühle) können diese Massenverluste vernachlässigt werden, weil die Tongehalte dieser Bodenproben im Mittel bei  $\leq 5\%$  liegen (Mueller (2013) und eigene Korngößenanalysen). Zur Qualitätssicherung wurde der Glühverlust bei einigen, besonders organikreichen, Proben dreifach gemessen und gemittelt.

### 2.5.2 Korngrößenanalysen

Bei der Korngrößenanalyse (Granulometrie) wurden zur Ermittlung der Sandfraktion (Partikelgrößen 2 bis 0,063 mm) die Naßsiegung (Tucker 1996: 63) und zur Ermittlung der Schluff- und Tonfraktionen (Partikelgrößen 0,063 bis 0 mm, ohne Auftrennung in gT, mT, und fT) die Pipettiermethode (Tucker 1996: 64) angewandt. Die Qualitätssicherung erfolgte über doppelte und zum Teil dreifache Messungen, dabei wurden Proben mit Abweichungen  $\pm 10\%$  nicht berücksichtigt.

### 2.5.3 pH-Wert

Die pH-Werte wurden elektrometrisch nach den Vorgaben von Blume et al. (2011) ermittelt. Dabei wurden die Proben für pH-Wert-Messungen in einer 0,01 mol  $\text{CaCl}_2$ -Lösung vorbereitet. Es wurden Dreifachmessungen unternommen, aus denen Mittelwerte berechnet und für die Auswertung genutzt wurden.

### 2.5.4 Phosphor- und Eisenanalytik

Die bodenchemischen Kennwerte  $P_t$  (Gesamtphosphor) und  $Fe_t$  (Gesamteisen) wurden an der Hochschule Osnabrück in der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Klaus Mueller ermittelt. Die Gesamt-P-Gehalte wurden mittels Glühaufschluss nach Bleck (1965 – modifiziert) (s. a. Mueller & Nagel (2012)) und Gesamteisen mittels Königswasser-Aufschluss bestimmt.

## 2.6 Fernerkundliche Methoden und GIS

Für topographische Analysen stehen fernerkundliche Sekundärdatensätze unterschiedlicher Art, Auflösung und Höhengenaugigkeit zur Verfügung (Tab. 2.4).

Geländedaten, die als Digitale Oberflächenmodelle (DOM) vorliegen, werden zu Übersichtszwecken und großräumigen Betrachtungen genutzt. Für feintopographische Analysen werden die Digitalen



Höhenmodelle (DHM) hinzugezogen. Sie werden im ArcGIS 10-ArcMap-Modul unter Verwendung der ‚*Conversion Tools*‘ zu Rasteroberflächen verarbeitet und im ‚*Spatial Analyst (Toolbox)*‘ analysiert. Außerdem wird der ‚*3D Analyst (Toolbox)*‘ herangezogen um Rasterprofile sowohl in fernerkundlichen Rastern als auch in Magnetogrammen anzulegen. Die o. g. ArcGIS Werkzeugzusammenstellungen werden auf der offiziellen Seite des Herstellers Esri unter der Rubrik Werkzeugreferenz aufgelistet und erläutert (Esri 2016).

**Tabelle 2.4: Übersicht, Genauigkeit und Herkunft genutzter fernerkundlicher Sekundärdaten.**

Bezeichnung	Erfassungsart	Gelände-modell-typ	Grund-auflösung	Z-Wert-Genauigkeit (±) oder Offset (+)	Abdeckung/Untersuchungs-gebiet	Quelle
<b>LiDAR</b>	Laser	DHM	0,5 x 0,5 m	+ 4,26 m	Karlsgraben	ArcTron 3D GmbH (2009)
<b>SRTM</b>	Shuttle-Radar	DOM	90 x 90 m	± 16 m	Karlsgraben und Umgebung	USGS (2016)
<b>DGM 5(1)</b>	Laser & Photogrammetrie	DHM	10 x 10 m	± 0,5 m	Oberesch und Umgebung	LGLN (2011)
<b>DGM 50</b>	Laser & Photogrammetrie	DHM	50 x 50 m	± 0,5 m	Oberesch und Lechtinger Esch	LGLN (2013)
<b>GMTED2010</b>	Shuttle-Radar	DOM	465 x 305 m	< 30 m	Europa	USGS (2016); Danielson & Gesch (2011)

### 3 Untersuchungsgebiete und Umweltarchive

Im vorliegenden Abschnitt werden die betrachteten Untersuchungsgebiete und untersuchte Umweltarchive beschrieben. Kapitel 3.1 widmet sich dabei zunächst einer großräumigen Betrachtung und Einordnung der untersuchten Standorte auf der Maßstabsebene von Naturräumlichen Großregionen 1., 2. und 3. Ordnung sowie naturräumlichen Haupteinheiten. Im zweiten Abschnitt des Kapitels (Kap. 3.2 und 3.3.) wird die physische Geographie der einzelnen Untersuchungsgebiete auf der Maßstabsebene der naturräumlichen Einheiten 6. Ordnung ausführlicher beschrieben. Es wird außerdem, einhergehend mit der physischen Geographie, die geoarchäologische Bedeutung der betrachteten Umweltarchive kurz durchleuchtet.

#### 3.1 Lage der Untersuchungsgebiete innerhalb von Großregionen

Die Untersuchungsstandorte werden in vorliegender Arbeit in zwei Hauptuntersuchungsgebiete (1. Oberesch und 2. Karlsgraben) und einen Vergleichsstandort (3. Lechtinger Esch) unterteilt (Abb. 3.1). Der Vergleichsstandort Lechtinger Esch wird aufgrund ähnlicher naturräumlicher Ausstattung mit dem Hauptuntersuchungsgebiet Oberesch verglichen. In den Hauptuntersuchungsgebieten werden alle, in Kapiteln 2.1 und 2.2 beschriebenen, magnetischen Methoden angewandt. Am Vergleichsstandort wird hingegen nur die Umweltmagnetik (Kap. 2.1) angewandt und überprüft.

Betrachtet man die Lage der Hauptuntersuchungsgebiete auf der Abbildung 3.1, stellt man fest, dass sie beide in Bezug auf die naturräumliche Gliederung nach Meynen et al. (1962\_B1) und Meynen et al. (1962\_B2) in Übergangsräumen bzw. Grensräumen von Großregionen liegen. Den markantesten Grenzraum, einen Naturraum zwischen Bergland und Niederung, stellt das Hauptuntersuchungsgebiet Oberesch dar. Es gehört zwar noch dem äußersten, südlichen Teil der naturräumlichen Haupteinheit Dümmer Geestniederung an, einem ebenen Tiefland (20 bis ~70 m ü. NN) im Nordwestdeutschen Tiefland (Großregion 1. Ordnung Stand 1994, s. z. B. bei Michler (1994)). Jedoch in nicht einmal einem Kilometer Entfernung, in südlicher Richtung, trifft man bereits auf einen völlig anderen Naturraum: auf einen Teil der Mittelgebirgsschwelle (Großregion 1. Ordnung) Namens Wiehengebirge (Abb. 3.3), das wie ein fast 160 m ü. NN-hoher Wall, scharf und unvermittelt die Haupteinheit Unteres Weserbergland nach Norden vom Tiefland abgrenzt (Meisel 1962; LGLN-DGM-50 2013). An der nordwestlichen Flanke des Unteren Weserberglandes, süd-westlich des von OSO nach WNW-verlaufenden Wiehengebirgszuges, liegt der Vergleichsstandort Lechtinger Esch.

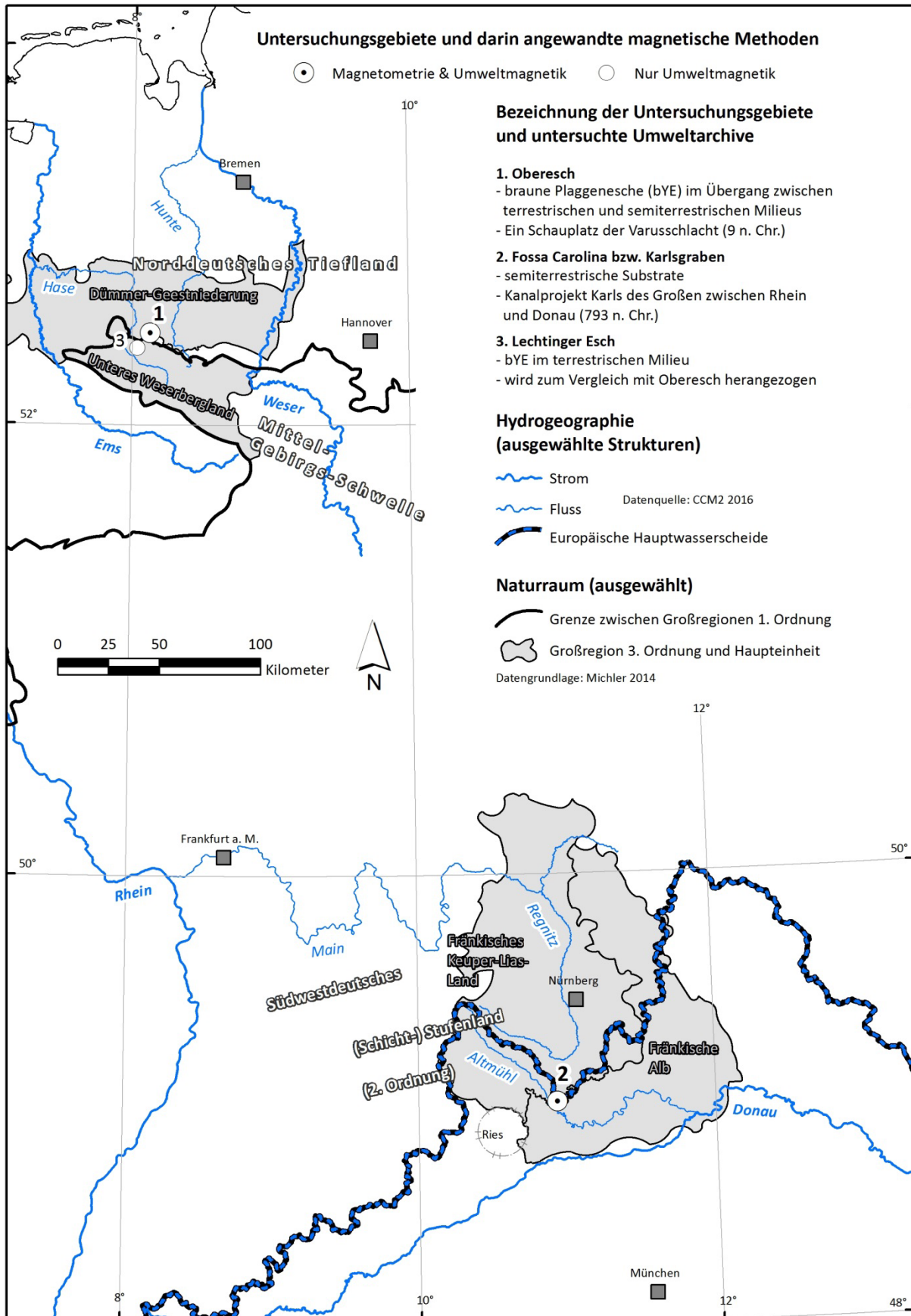


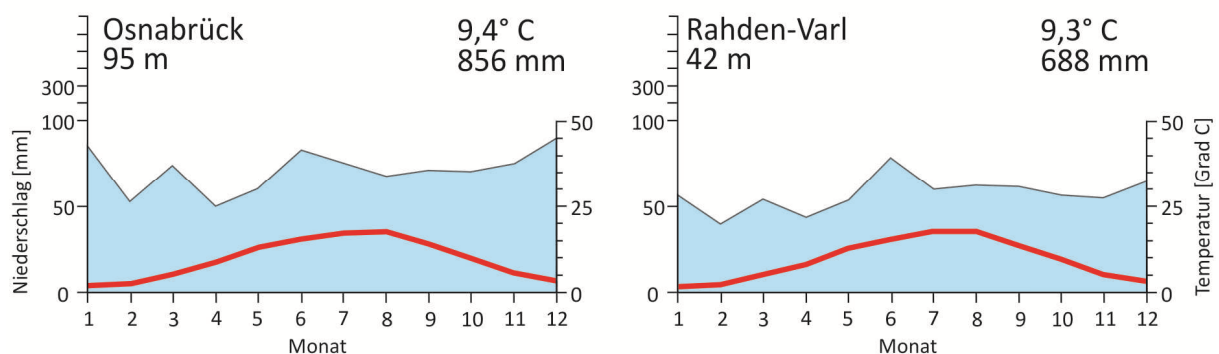
Abbildung 3.1: Lage der Untersuchungsgebiete innerhalb von Großregionen und eine kurze Charakterisierung.

Auch das Hauptuntersuchungsgebiet Karlsgraben liegt in einem außerordentlichen Übergangs- bzw. Grenzraum. Und zwar in zweierlei Hinsicht: zum Einen liegt es am Übergang zwischen zwei naturräumlichen Großregionen 3. Ordnung, wo sich eine scharf gezogene, steile Reliefgrenze der, im Mittel 500 m ü. NN hohen, Fränkischen Alb gegen das tiefer liegende (220 bis max. 500 m), zertalte Berg- und Hügelland des Fränkischen Keuper-Lias-Landes abgrenzt (Otremba 1962). Zum Anderen liegt es in einem physisch-geographischen und naturräumlichen Gunstraum, in dem es im Frühmittelalter einen ambitionierten Versuch gab eine hydrogeographische Grenze zu überwinden: die Europäische Hauptwasserscheide (Zielhofer & Kirchner 2014, dazu mehr in Kap. 3.3).

### 3.2 Untersuchungsgebiet Oberesch und Vergleichsstandort Lechtinger Esch

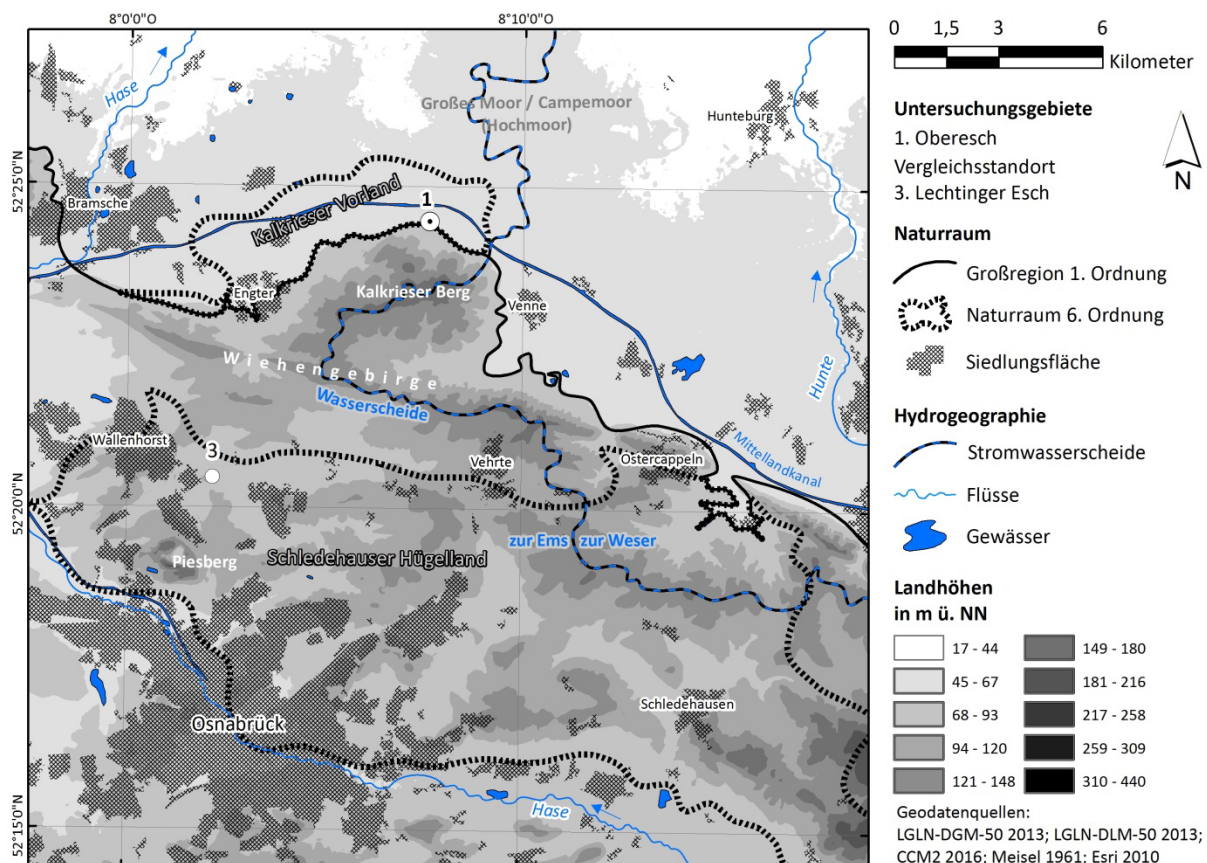
#### 3.2.1 Naturraum und physische Geographie

Im Grenzraum zwischen der atlantischen Dümmer-Geestniederung und des kontinentalen Unteren Weserberglandes (nach Ssymank (1994)) liegen das 1. Hauptuntersuchungsgebiet Oberesch und der Vergleichsstandort Lechtinger Esch. In Bezug auf die mittlere Jahresdurchschnittstemperatur sowie auf den Temperaturverlauf innerhalb eines Jahres unterscheiden sich die betrachteten Standorte kaum. Es ist jedoch ein gewisser Unterschied im Jahresdurchschnittsniederschlag zu verzeichnen. Mesoklimatisch ist dieser kleine Unterschied auf die Lage der südöstlichen Dümmer-Geestniederung und des Oberesch auf der Leeseite des Wiehengebirges und des Gehns zurückzuführen (nach GKfW (1986)). So kann das Gesamtklima des Standortes Lechtinger Esch, als vorwiegend atlantisch bezeichnet werden, wohingegen der Oberesch durchaus kontinentale Einflüsse zeigen kann (Abb. 3.2) (Meisel 1959; Niemeier 1962; GKfW 1986). Der Lechtinger Esch und der Oberesch werden beide von zunächst unterschiedlichen, untergeordneten Vorflutern in die Hase und über die Hase in die Ems entwässert.



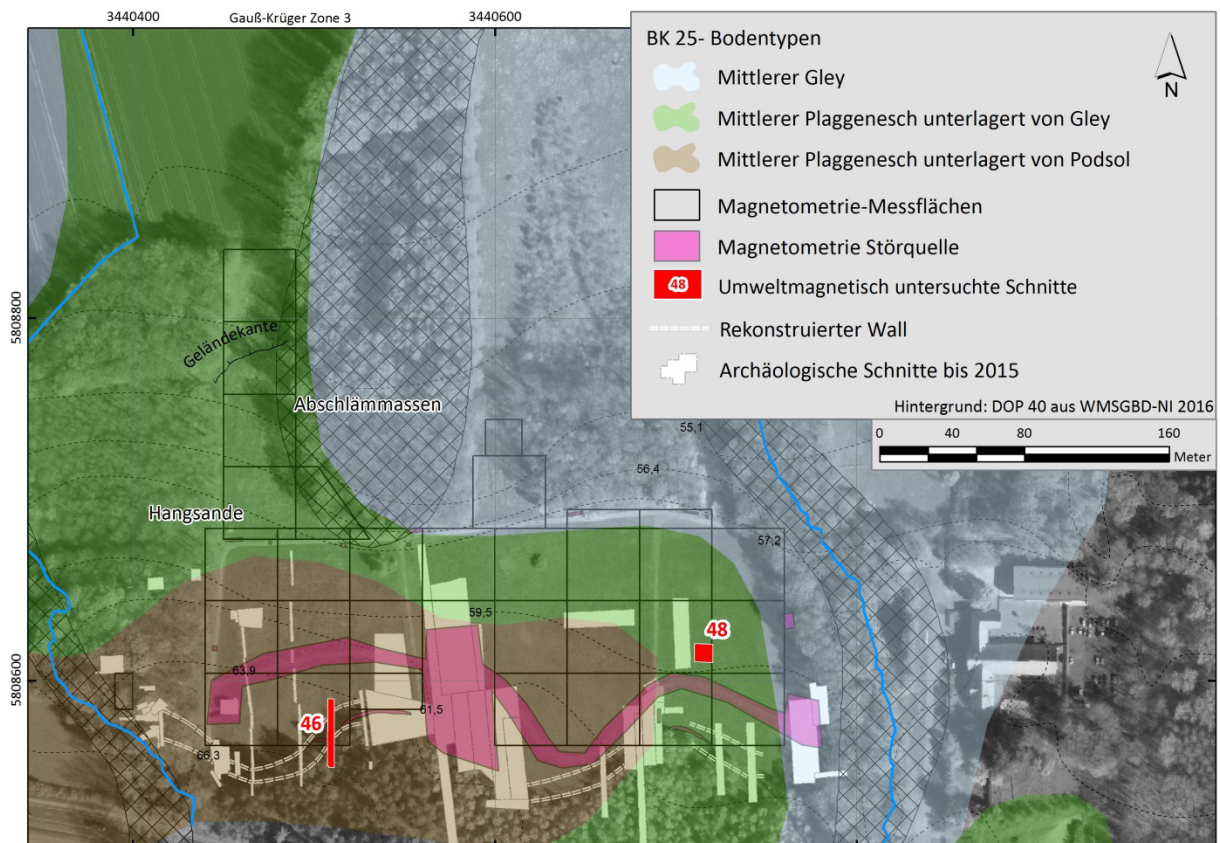
**Abbildung 3.2:** Klimadiagramme von Osnabrück und Rahden-Varl (aus Mühr (2007: o. S., modifiziert)). Das linke Klimadiagramm steht für das Klima des Lechtinger Esch, das Klima des Oberesch ist zwischen den beiden Klimaten einzuordnen. In die Darstellung flossen Mittelwerte aus dem Zeitraum von 1971 bis 2000. Zur Lage der Klimastationen siehe Abb. 3.6.

Auf der Maßstabebene der naturräumlichen Einheiten 6. Ordnung betrachtet (Abb. 3.3), liegt Oberesch am südöstlichen Rand der Naturraumeinheit Kalkrieser Vorland. Diese Einheit säumt den Nord- und Westfuß des Kalkrieser Berges, eines bis zu 4 km in die Tiefebene hineinragenden und bis zu 150 m ü. NN hohen Teils des Wiehengebirges. Das leicht nach Norden abfallende, östliche Kalkrieser Vorland weist Höhenniveaus von 70 (am Hangfuß des Kalkrieser Berges) bis 42 m ü. NN (am Südrand des Großen Moores) auf. Es wird vorwiegend ackerbaulich genutzt. Feuchte Niederungen in Einzugsbereichen der, aus dem Kalkrieser Berg nach Norden quellenden, Fließgewässer sind von Grünland geprägt oder von Bruch- und/oder Mischwäldern bestockt. Die Siedlungsstruktur des Naturraums besteht aus Einzelhöfen, die über das gesamte Gebiet verstreut sind. Außerdem wird das Kalkrieser Vorland auf der gesamten Ost-West-Länge vom Mittellandkanal durchzogen (Meisel 1961; LGLN-DGM-50 2013; WMSGBD-NI 2016). Auf der Flur Oberesch wird seit einigen Jahren ein, dem Museum und Ausstellung zur Varusschlacht angeschlossener, Museumspark betrieben. In diesem Museumspark finden regelmäßig archäologische Ausgrabungen statt (s. a. ViOLMuPK (2016)). Im Rahmen zweier Ausgrabungen wurden auch magnetometrische und umweltmagnetische Untersuchungen durchgeführt, die Gegenstand vorliegender Arbeit sind.



**Abbildung 3.3:** Naturraum und Umgebung des Untersuchungsgebietes Oberesch und des Vergleichsstandortes Lechtinger Esch. Die Grenze der Großregion 1. Ordnung wurde unter zu Hilfenahme des LGLN-DGM-50 (2013) optimiert.

Geologisch wird das Kalkrieser Vorland im Bereich des Oberesch von weichselzeitlichen, periglazial-verspülten Hangsanden dominiert (Anhang E). In Senken und Tälern werden diese, zumeist feinsandigen, Hangsande von schluffigen und z. T. humosen Feinsanden überdeckt. Sie werden geogenetisch als holozäne Abschlammungen gedeutet und begrenzen auf der amtlichen Geologischen Karte 1 : 25.000 (im Folgenden auch GK25) den Oberesch nach Osten und Westen. Das Liegende der Hangsande bilden malmzeitliche, bankig gelagerte Ton-, Mergel-, Kalk- und Sandsteine. Dieses jurazeitliche Deckgebirge, aus welchem zum größten Teil der Kalkrieser Berg aufgebaut ist, taucht nach Norden hin unter die quartären Ablagerungen des Vorlandes ab und gilt als die älteste, zu Tage tretende, regionale Stufe des Kalkrieser Vorlandes. Im Bereich des Mittellandkanals besteht das dem Malm hangende Quartär aus weichselzeitlichen, fluviatilen Niederungssanden. Diese Niederungssande und im Nordosten des Kalkrieser Vorlandes anschließenden holozänen Anmoorbildungen (südlicher Rand des Großen Moores) trennt ein geschlossenes Band aus Flugsanden, das in die jüngere Weichsel-Kaltzeit, aber teils auch in das Holozän datiert wird (Mengeling 1986; Klassen 1984; Hinze & Meyer 1984).



**Abbildung 3.4: Bodentypen am Oberesch (LBEG-BK-25 2011).** Eingetragen sind außerdem der größte, rekonstruierte Befund der archäologischen Stätte: ein Kriegswall, sowie archäologische Schnitte, die bis 2015 auf der Flur angelegt wurden (Quelle: Klaus Fehrs, Archäologie am Museum und Park Kalkriese). Außerdem sind Messgrids, innerhalb derer die Magnetometerprospektion stattfand und Schnitte, in denen Umweltmagnetische Untersuchungen durchgeführt wurden, eingezeichnet. Ebenfalls eingezeichnete Störquellen für die Magnetometrie bilden massive Eisenobjekte auf der Oberfläche (Pavillons, Trittplatten, Spundwände usw.). Abschlammungen sind der LBEG-GK-25 (2011) entnommen.

Auf der Hangsand-geprägten Geesthöhe des Kalkrieser Vorlandes treten die Plaggenesche als dominante Bodentypen auf. Sie nehmen außerdem große Flächen der Flugsande und trockenere Areale der Niederungssande ein (vgl. Anhang E mit Abb. 3.6). Auch auf dem Oberesch – wie der Name bereits andeutet – sind im gesamten südlichen Bereich der Flur die Plaggenesche dominant. Lediglich nach Norden und Nordosten hin, in feuchteren Senken und im Bereich der östlichen und westlichen Täler, überlagert zunächst der Plaggenesch teils grundwassererfüllte Gleye und wird in tieferen Geländebereichen schließlich gänzlich von den Grundwasserböden abgelöst (Abb. 3.4) (LBEG-BK-25 2011; LBEG-BÜK-50 2014; Mengeling 1986; Hinze & Meyer 1984). Diese bodentypologische Situation am Oberesch ist zunächst eine oberflächliche, großmaßstäbige Sicht. Tolksdorf-Lienemann (2007) und Lienemann & Tolksdorf-Lienemann (1992) beschreiben auf dem Maßstabsniveau einer archäologischen Grabung eine erwartungsgemäß komplexere Bodenvergesellschaftung auf dem Oberesch.

Als Vergleichsstandort für das Hauptuntersuchungsgebiet Oberesch wurde der etwa 9,5 km in südwestlicher Richtung, im nordwestlichen Bereich des Schledehauser Hügellandes, liegende Lechtinger Esch gewählt (Abb. 3.3). Im Hinblick auf das Ausgangssubstrat findet man hier eine dem Oberesch ähnliche Situation vor (mdl. Mitt. K. Mueller (2016)). Mit dem Unterschied, dass hier den Hangsanden obertriassische Tongesteine sowie Mergel mit Gipseinschaltungen (Gipskeuper) unterliegen und unter der Plaggenauflage eine mittlere Braunerde ansteht (Abb. 3.5) (LBEG-BK-25 2011; LBEG-BÜK-50 2014; LBEG-GK-25 2011; Hinze 1979).

Den Naturraum des westlichen Schledehauser Hügellandes bildet ein eher unregelmäßig gestaltetes, unübersichtliches Berg- und Hügelland, das durch kleinräumige Wechsel von unterschiedlichen Landschaftseinheiten geprägt ist und einen offenen, durchgängigen und vorwiegend hügeligen Charakter zeigt. Hier werden Höhengniveaus von 70 m ü. NN in den Niederungen bis max. 180 m ü. NN am Piesberg erreicht (Abb. 3.3). Das Land steht fast vollständig unter Acker, zahlreiche Haufenwegedörfer in den Mulden am Rande der Niederungen deuten darauf, dass das Gebiet schon zu alter Zeit besiedelt wurde (Meisel 1961; LGLN-DGM-50 2013; WMSGBD-NI 2016).

Der Plaggeneschstandort an der Lechtinger Mühle repräsentiert eine Komposition aus wesentlichen Elementen der Plaggeneschwirtschaft: ein mittelalterliches Eschflächenensemble, Entnahmeflächen und Eschkanten (Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz 2016). Der Lechtinger Esch kann somit als Paradebeispiel für einen braunen Plaggenesch angesehen werden. An einer der Eschkanten befindet sich das zum Vergleich mit dem Oberesch stehende Profil (Abb. 3.5). Das Bodenprofil ist bodenkundlich bereits ausführlich beschrieben und untersucht. Wie bereits erwähnt, wurden die Bodenansprache, die Laboranalytik und die Proben für die Umweltmagnetik freundlicherweise von Prof. Dr. Klaus Mueller von der Hochschule Osnabrück zur Verfügung gestellt.



**Abbildung 3.5:** Lage des Eschprofils und die Bodenkundliche Situation in der Umgebung des untersuchten Vergleichsstandortes Lechtinger Esch (Geodaten: LBEG-BK-25 (2011); Hintergrund: DOP-40 aus WMSGBD-NI (2016)).

Der Bodentyp Plaggensch steht als Umweltarchiv im Fokus der vorliegenden Untersuchung. Deshalb wird seine Entstehung und geoarchäologische Bedeutung im nächsten Unterkapitel erläutert.

### 3.2.2 Entstehung, Eigenschaften und Bedeutung der Plaggensesche

Die Plaggensesche sind für das Kalkrieser Vorland, das Schleddehauser Hügelland, wie auch für den gesamten nordwestdeutschen Raum mitsamt der angrenzenden Gebiete in den Niederlanden sowie für das südwestliche Dänemark typisch. Der nach Ad-hoc-AG Boden (2005) zur Klasse der terrestrischen anthropogenen Böden gehörende Bodentyp Plaggensch [YE] ist felddiagnostisch anhand seines mehr als 40 cm mächtigen Ah+E-Horizontes zu erkennen. Dieser, gar bis zu 120 cm mächtige (Makowsky et al. 2013: 47), Ah+E-Horizont ist Folge einer lang andauernden Plaggenschwirtschaft (Ad-hoc-AG Boden 2005). Behre (1976 und 2008) datiert die Anfänge der Plaggenschwirtschaft als Ackerkultur in das 10. Jahrhundert n. Chr., als der starke Bevölkerungsdruck zur Ausdehnung und Intensivierung des mittelalterlichen Ackerbaus führte.



Im Unteren Weserbergland und in seinen nordwestlich benachbarten Großregionen kam es damals zur Ausbildung des Einfeldsystems mit einem Esch als dorfnaher Ackerflur. Das geographische Muster dieser dorfnahen Ackerflur ist an der heutigen räumlichen Verteilung des Bodentyps in der Abbildung 3.6, am besten um die Siedlungen Hunteburg und Bohmte, zu beobachten. Diese Siedlungen stehen dabei im Gegensatz zu den Gebieten um Rahden im Nordosten, wo nach Behre (2008: 176, nach Müller-Wille (1938) umgezeichnet) im Mittelalter eher die Vierfelderfolge und kein Einfeldsystem typisch war. Deshalb findet man um Rahden herum heute keine Plaggengesche vor.

Auf den Eschen im Einfeldsystem wurde Jahr für Jahr auf derselben Fläche fast ausschließlich Winterroggen angebaut (Ewiger Roggenbau). Die Beanspruchung des Ackerbodens war so enorm, dass der Stallmist zur Düngung nicht mehr ausreichte. Deshalb stach man unter hohem Arbeitsaufwand humose Soden (auch Plaggen, abgeleitet vom Begriff Plackerei = schweißtreibende Arbeit) in Wald- und Allmendeflächen, verfrachtete sie als Einstreu in die Stallungen, kompostierte sie und brachte sie schließlich auf den Esch auf. Beim Plaggenstechen kam mit der Humusaufgabe auch das darunter liegende, anorganische Bodenmaterial mit. Dieses Material trug neben den Rasensoden dazu bei, dass die Eschauflagen, bzw. die heutigen E-Horizonte nach jahrhundertelanger Plaggenwirtschaft immer mächtiger wurden (Behre 2008).

Als die Wälder zurückgingen, stach man Plaggen auf Heideflächen. Den Heideplaggen war Ae-Material der Heidepodsole beigemischt. Dies führte dazu, dass man heute zwischen grauen Plaggengeschen aus Heideplaggen und braunen Plaggengeschen aus Waldplaggen unterscheiden kann (Ad-hoc-AG Boden 2005). Letztere findet man an den betrachteten Standorten Oberesch und Lechtinger Esch (Mueller 2000). Neben den mächtigen Eschhorizonten gelten als weitere charakteristische Merkmale der Plaggengesche hohe Humusanteile und hohe Gesamtphosphorgehalte (Ad-hoc-AG Boden 2005; Eckelmann 1980; Makowsky et al. 2013).

Der Gesamtphosphor wird auch in vorliegender Arbeit als Proxy und Identifikationsparameter für Plaggenaufgaben herangezogen. Dabei werden  $P_t$ -Werte (Phosphor total-Wert) von  $> 35 \text{ mg/100g}$  – v. a. bei sandigen Bodenarten – als eindeutige Indikatoren von Eschhorizonten verstanden (mdl. Mitt. K. Mueller (2016) und nach Scheffer/Schachtschabel (2002)).

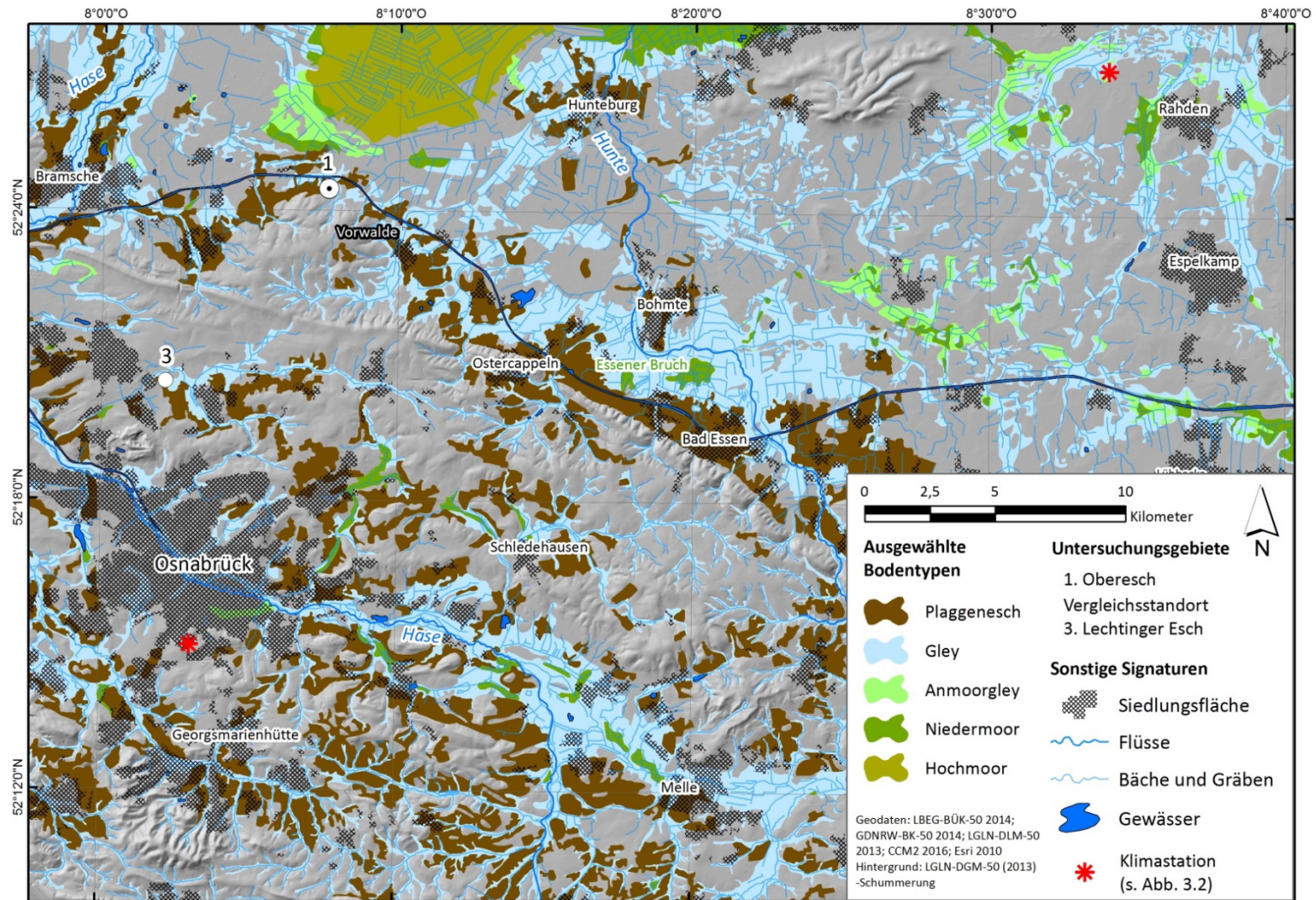
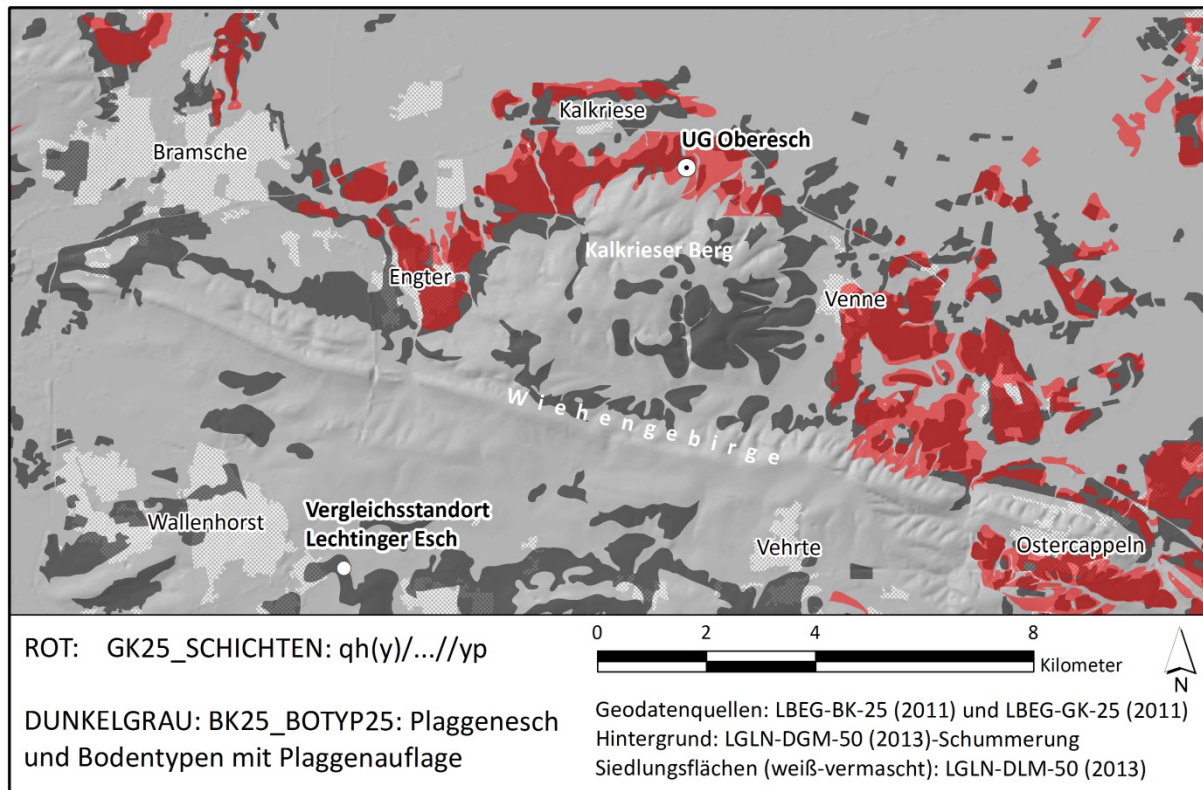


Abbildung 3.6: Verteilung der Plaggenesche und weiterer, ausgewählter Bodentypen am Übergang zwischen den Großregionen Unteres Weserbergland und Dümmer Geestniederung. Plaggenesche und Gleye sind nicht differenziert. Länderspezifische Nomenklaturen wurden angeglichen (z. B.: Gley mit Erdniedermoorauflage => Anmoorgley).



**Abbildung 3.7: Widersprüche zwischen geologischen (rot) und bodenkundlichen (dunkelgrau) Kartierungen der Plaggenesche/Plaggenauflagen.**

Allerdings gibt es einige Aspekte in der Zeitstellung und in der Ansprache der Plaggenesche, die die vorangegangenen Ausführungen in einen gegenwärtig immer noch andauernden Diskurs rücken. Im Hinblick auf die Altersstellung sind der Fachwelt bereits seit längerer Zeit sehr alte Plaggenesche in den Niederlanden bekannt. Diese werden in den Primärquellen in die Zeit um Christi Geburt datiert (500 v. Chr. bis 100 n. Chr., aus Eckelmann (1980: 10, zitiert nach Hammen (1965)). Weiterhin gibt es problematische Unsicherheiten bei der Unterscheidung zwischen Plaggeneschen und Kolluvisolen in hügeligen, erosionsanfälligen Landschaften (Makowsky et al. 2013). Die Tragweite dieses Problems für hochaufgelöste Kartierungen wird in der Abbildung 3.7 plakativ dargestellt, wo sich geologische und bodenkundliche Karten im Maßstab 1 : 25 000, insbesondere im nordwestlichen Schleddehauser Hügelland, widersprechen (vgl. Bußmann (2014)). Der digitalen GK 25 nach finden Geologen, die bei Kartierungen Plaggenauflagen ebenfalls als yp-Schichten aufnehmen (Preuss et al. (2002) und Anhang E), im Bereich des Lechtinger Esch und des gesamten nordwestlichen Schleddehauser Hügellandes keine Plaggenauflagen. Auf der digitalen BK 25 sind hingegen weite Flächen des Naturraums von Plaggeneschen und Böden mit Plaggenauflage auskartiert. Ferner fehlt allen Bodenbasisdaten, im Hinblick auf eine bodengeographische Betrachtung der Esche, die o. g. Differenzierung zwischen braunen und grauen Plaggeneschen.

Bei allen geschilderten, diskussionsgeladenen Unsicherheiten ist man sich in der Fachwelt in einem Punkt jedoch einig: Plaggengesche sind wertvolle Umweltarchive. Sie sind Zeugen der Landnutzung und der Siedlungsgeschichte ebenso wie Namensgeber von Straßen und Ortschaften (Greiten 2013). Von der LABO (2010) werden sie als Archive der Kulturgeschichte bezeichnet. Denn sehr oft wurde bei Ausgrabungen beobachtet, dass aufgrund des über Jahrhunderte aufgehäuften, mächtigen Plaggenauftrags, die Befunde aus der Zeit vor der Plaggenwirtschaft aus dem zerstörerischen Wirkungsbereich des Pfluges herausgenommen und somit von der Plaggenauflage quasi konserviert wurden. So auch die Befunde und Funde am Oberesch, wo Reste einer mehr als 2000 Jahre alten Schlacht – viele, schwer wiegende Indizien sprechen für ein Kampfareal der Varusschlacht um 9. n. Chr. (Moosbauer & Wilbers-Rost 2009; Rost & Wilbers-Rost 2012) – vom Plaggengesch überdeckt und erhalten wurden.

### **3.3 Untersuchungsgebiet Karlsgraben (Fossa Carolina)**

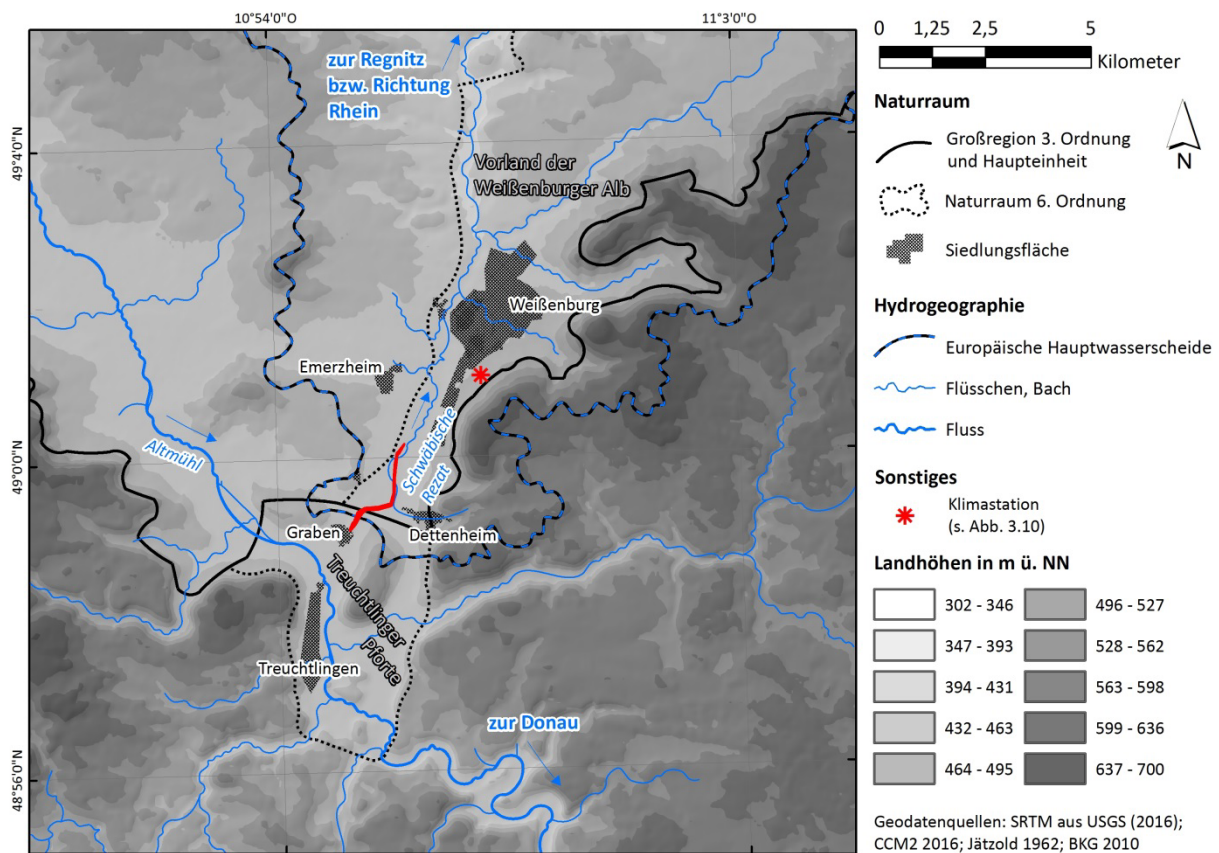
#### **3.3.1 Lage und geoarchäologischer Hintergrund des Karlsgrabens**

Direkt an der Grenze zwischen dem Fränkischen Keuper-Lias-Land und der Fränkischen Alb (Abb. 3.1), am Übergang von der Treuchtlinger Pforte in das Vorland der Weißenburger Alb, süd-südwestlich der Stadt Weißenburg, liegt das 2. Hauptuntersuchungsgebiet: der Karlsgraben (Abb. 3.8). Auch unter der Bezeichnung Fossa Carolina bekannt, zählt der, mittlerweile umfangreich erforschte (Ettel et al. 2014), Karlsgraben zu den außergewöhnlichsten und vermutlich auch zu den aufwendigsten Projekten Karls des Großen. Da dem fränkischen Herrscher die hohe Mobilität auf dichtem Wasserwegenetz östlich des Rheins besonders wichtig war und er seine Herrschaft quasi zu Schiff ausübte. Beschloss er, aufgrund der Eingliederung des Herzogtums Bayern, dem Handel mit den östlichen Nachbarn und wegen der Awarenkriege, im Jahre 793 n. Chr. sein Wasserwegenetz bis in das Einzugsgebiet der Donau auszuweiten. Um dies zu ermöglichen mussten seine Wasserbauingenieure die europäische Hauptwasserscheide durchqueren bzw. kanalisieren. Die europäische Hauptwasserscheide ist eine hydrogeographische Grenze zwischen zwei Stromeinzugsgebieten: dem Rhein-Einzugsgebiet, das große Teile des westlichen Mitteleuropas zur Nordsee entwässert und dem Donau-Einzugsgebiet, das ebenfalls große Flächen des südöstlichen Mitteleuropas und der Ostalpen in Richtung Schwarzes Meer entwässert (Berg-Hobohm et al. 2014a; Zielhofer et al. 2014).

Der gewaltige Grabenaushub der zentralen Grabenzone, der noch heute die Tallandschaft zwischen den Orten Graben und Dettenheim mitprägt, ist im Gelände und in hochaufgelösten LiDAR-Geländemodellen deutlich auszumachen (Berg-Hobohm & Werther 2014). Doch warum wurde gerade hier ein solches Bauwerk errichtet? Zielhofer & Kirchner (2014) sehen die Hauptgründe in der naturräumlichen Gunstlage.

### 3.3.2 Naturraum und physische Geographie des Karlsgrabens

Der von Zeugenbergen und weiten Talböden geprägte Naturraum Treuchtlinger Pforte bildet einen trichterartigen Eintritt der Altmühl in den Albkörper (Abb. 3.8). Er ist das Ergebnis einer komplizierten Flussgeschichte von Altmühl und Urrezat. Denn die mittelpleistozänen Talverschüttungen, die vom südlichen Vorland der Weißenburger Alb bis in das Altmühltal reichen, zeigen, dass die Urrezat im Pleistozän noch in Richtung Südwesten, also in das Altmühltal entwässerte (Schmidt-Kaler 1976; Jätzold 1962). Gerade in diesem bereits natürlicherweise angelegtem Durchbruch, in dem sich die Rhein-Donau-Flusssysteme heute bis auf 1800 m annähern, sehen Zielhofer & Kirchner (2014: 6) eine regional herausragende Option für einen Kanal.

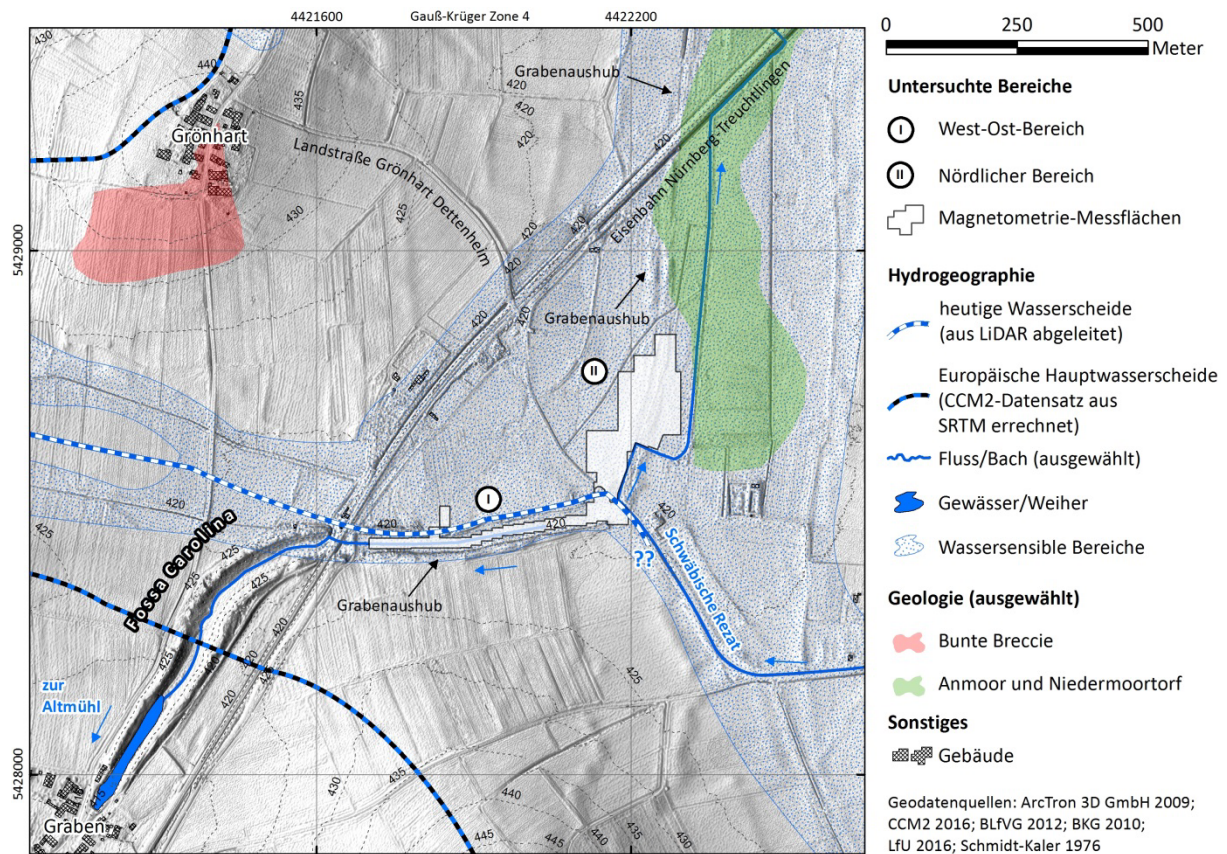


**Abbildung 3.8: Naturraum und vereinfachte Hydrogeographie des Karlsgrabens. Der heute im Gelände sichtbare und aus dem LiDAR-DGM abgeleitete Grabenverlauf ist rot eingezeichnet (Werther 2013).**

Vorliegende Untersuchungen fanden östlich der Eisenbahnlinie Nürnberg-Treuchtlingen, in West-Ost-Bereichen (I in Abb. 3.9) und Nördlichen Bereichen (II in Abb. 3.9) des Grabens statt (s. a. II und III bei Zielhofer et al. (2014)). Dieses Gebiet gehört naturräumlich bereits dem Vorland der Weißenburger Alb an, einem flachwelligen, leicht bewegten Hügelland (Jätzold 1962) (Abb. 3.8 und 3.9). Die untersuchten Bereiche weisen Höhenniveaus von 413 bis knapp über 420 m ü. NN auf (USGS 2016 (SRTM-DOM); ArcTron 3D GmbH 2009 (LiDAR-DGM)). Die Grabenreste sind im West-Ost-Bereich

noch deutlich, im Nördlichen Bereich nur noch lokal durch, im Gelände kaum sichtbare, im LiDAR-DGM jedoch deutlich erkennbare (Abb. 3.9), Aushubwälle zu sehen (Berg-Hobohm & Werther 2014).

Die oberflächlich anstehende Geologie der betrachteten Gebiete wird im West-Ost-Bereich von, bereits erwähnten, mittelpleistozänen, lehmig-sandigen und leicht grabbaren Talverschüttungen dominiert. Im Nördlichen Bereich liegen Talfüllungen der Schwäbischen Rezat und westlicher Zuflüsse sowie Anmoor- und Niedermoortorfe vor (Zielhofer & Kirchner 2014; Schmidt-Kaler 1976). Letztere sind Folge des hochanstehenden Grundwasserspiegels in der Rezataue (Zielhofer et al. 2014). Laut Bayerischem Landesamt für Umwelt (LfU) befinden sich beide untersuchte Abschnitte des Karlsgrabens in wassersensiblen Bereichen (Abb. 3.9). Von Wasser geprägt, werden solche Bereiche anhand von Mooren, Auengleyen und Kolluvien abgegrenzt (LfU 2016).

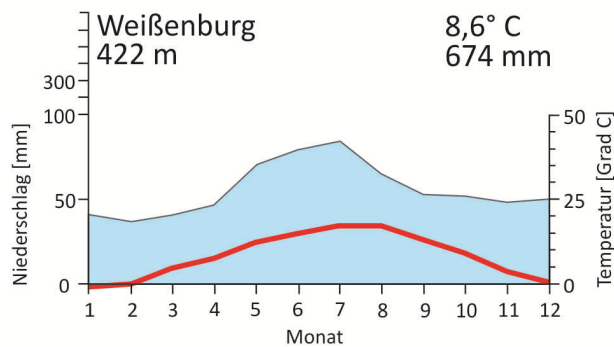


**Abbildung 3.9:** Lage der untersuchten Bereiche und der Messflächen für die Magnetometerprospektion innerhalb des sichtbaren Grabenverlaufs. Die Magnetometerprospektion erfolgte direkt an und in der Umgebung der heutigen Wasserscheide (Zielhofer & Leitholdt 2014; Stele & Busmann 2013).

Der Nördliche Bereich wird hauptsächlich vom Hangzugzwasser und dem Zufluss der Rezatquelle versorgt. Dabei quellt die Schwäbische Rezat mit einer täglichen Wassermenge von etwa 500 m<sup>3</sup> aus der östlich von Dettenheim liegenden Hochfläche (Abb. 3.8), die aus malm- und doggerzeitlichen Gesteinen besteht (Zielhofer & Kirchner 2014; Zielhofer & Leitholdt 2014; Schmidt-Kaler 1976). Vom Zufluss und vom Einfluss der Rezat ist der West-Ost-Bereich, in Folge des Kanalbaus und der damit

einhergehenden Verschiebung der Wasserscheide, abgeschnitten worden (nach Zielhofer & Leitholdt (2014)). Fernerkundliche LiDAR-Analysen von Stele & Bussman (2013) und Geländebegehungen haben nämlich ergeben, dass die heutige Wasserscheide im Bereich des Bauwerks bis zu 850 m nord-östlicher verläuft als die ehemalige Talwasserscheide bzw. die Wasserscheide des, aus großmaßstäbigeren DOM's errechneten, CCM2-Datensatzes (CCM2 2016; Vogt et al. 2010) (Abb. 3.9). Zielhofer & Leitholdt (2014) sehen hinter dieser Verlegung der Wasserscheide ein wasserbauliches Konzept der Kanalerbauer.

Anders als am Oberesch und am Lechtinger Esch, wo Böden als Umweltarchive Gegenstand der Untersuchungen sind, treten am Karlsgraben also semiterrestrische Sedimente als Umweltarchive in den Fokus. Um die, im vorangegangenen Absatz erläuterte, hydrologische Situation am Karlsgraben zu komplettieren wird im folgenden Absatz der Blick auf das Klima der Fossa Carolina gelenkt und mit dem 1. Hauptuntersuchungsgebiet verglichen.



**Abbildung 3.10: Klimadiagramm der Stadt Weißenburg (aus Mühr (2007: o. S., modifiziert)). In die Darstellung flossen Mittelwerte aus dem Zeitraum von 1971 bis 2000. Zur Lage der Klimastation siehe Abb. 3.8.**

Im Gegensatz zum Oberesch und seinem Vergleichsstandort im Unteren Wesebergland (Kap. 3.2) zeigt das Klima und die Biogeographie des Karlsgrabens einen deutlichen kontinentalen Charakter (Otremba 1962; Ssymank 1994). Zwar ist die Jahrestemperaturkurve (Abb. 3.10) den Temperaturkurven der Klimadiagramme von Osnabrück und Rahden (Abb. 3.2) ähnlich, die Lufttemperatur im Jahresmittel fällt jedoch um fast 1°C niedriger aus. Einen deutlichen Unterschied zwischen den Untersuchungsgebieten zeigt außerdem die Niederschlagsverteilung im Jahresverlauf. Am Karlsgraben ist ein viel eindeutigeres Maximum in den Sommermonaten auszumachen, welches mitunter zu starken saisonalen Schwankungen der Wassermengen in den Flüssen und Bächen um den Karlsgraben beiträgt (s. a. Zielhofer & Leitholdt (2014)). Im Jahresmittel ist die Niederschlagsmenge niedriger als im atlantisch geprägten Osnabrück. Der mittlere Jahresniederschlag des Vorlandes der Weißenburger Alb kommt eher an den Wert von Rahden heran. Otremba (1962: 181) spricht sogar von einem verhältnismäßig trockenen Mittelgebirgsklima im Vorland. Dabei wirke zwar der Albtrauf der Fränkischen Alb östlich und südöstlich von Weißenburg (s. a. Abb. 3.8) als Regenfänger, er sei jedoch nicht hoch genug um spürbare klimatische Unterschiede zwischen dem Vorland und dem Hochland hervorzurufen, so Otremba (1962: 147).

Nach einer Erläuterung der Grundlagen und Methoden im vorangegangenen Kapitel, einer Beschreibung der Untersuchungsgebiete und der untersuchten Umweltarchive im vorliegenden Kapitel, widmet sich der nächste, große Abschnitt der vorliegenden Arbeit den Ergebnissen und einer Diskussion der Ergebnisse.



## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Magnetometerprospektion am Oberesch

Magnetometrische Messungen am Oberesch wurden innerhalb zweier Messkampagnen im Sommer des Jahres 2014 durchgeführt. Eine Fläche von über 4 ha konnte abgelaufen und gemessen werden. Dabei konnten Magnetometerdaten über unterschiedlichen Nutzungen, Bodentypen und Geologien im Museumspark akquiriert werden (Abb. 3.4). Leider war der größte und markanteste Bodenbefund des Schlachtfeldes – ein verstürzter Kriegswall und ein ihm im Süden anschließender Drainagegraben (Rost & Wilbers-Rost 2012; der Drainagegraben ist in der Abb. 3.4 aus Übersichtsgründen nicht eingezeichnet) – nicht prospektierbar. Gründe dafür waren zum einen massive Störquellen (Eisenplatten, Eisenpavillons) und zum anderen dichter Bewuchs in den Wall-Grabenbereichen. Das dem Wall im Norden anschließende, archäologisch bisher noch nicht untersuchte, Areal konnte jedoch problemlos begangen und prospektiert werden. Außerdem konnte eine kleine Fläche im Wald, im Westen der Flur, probeweise gemessen werden (Abb. 3.4).

Bei folgenden Ausführungen ist zu beachten, dass die Magnetometerprospektion jünger als fast alle in der Abbildung 4.1 eingezeichneten archäologischen Schnitte ist. So sind die Anomalien innerhalb der Schnitte auf Grabungstätigkeiten und -hinterlassenschaften zurückzuführen. Nur der Schnitt 48 wurde nach der Magnetometerprospektion angelegt. Ebenfalls sollte beachtet werden, dass die im Park angelegten Wege keine Anomalien in den Magnetogrammen erzeugen. Lediglich die Hinweistafeln und Sitzbänke in der Nähe der Wege verursachen magnetische Schatten und große Dipolanomalien im Messbild.

Die Abbildung 4.1 stellt alle Magnetogramme (mit Maggramm abgekürzt) aus den Magnetometermessungen am Oberesch dar. Die Magnetogramme W und Z1 ausgenommen, sind alle Messbilder durch ruhige, unruhige und im Magnetogramm A-D sogar durch sehr große, unruhige Bereiche gekennzeichnet. Aus alten, georeferenzierten Luftbildern konnte abgeleitet werden, dass Letztere, sich im östlichen Grid C8 befindende Anomalien, auf Fundamentreste eines Stalls zurückzuführen sind. Die übrigen, unruhigen Magnetogrammabschnitte, die als flächenhaft zusammengeballte Häufungen von Dipolen auftreten – die markantesten sind in den Grids X2, X3, und C7 zu beobachten – können derzeit nicht hinreichend erklärt werden. Sie zeigen jedoch ein deutliches, räumliches Muster: die Dipolhäufungen treten verstärkt auf von Gleyen unterlagerten Plaggeneschen auf (vgl. mit Abb. 3.4). Die Plaggenesche, die laut BK 25 von Podsolen unterlagert werden und im Gelände höher liegen, weisen hingegen nur vereinzelte Grüppchen von Dipolen auf. Die linienhaft angeordneten Dipole, die sich durch das südliche Grid C2, im Bereich von Podsolen unterlagerter Plaggenesche ziehen, stammen höchstwahrscheinlich von einer Tribüne, die im Rahmen der Römertage im Jahre 2009 aufgebaut wurde (Mdl. Mitt. S. Wilbers Rost (2014)).

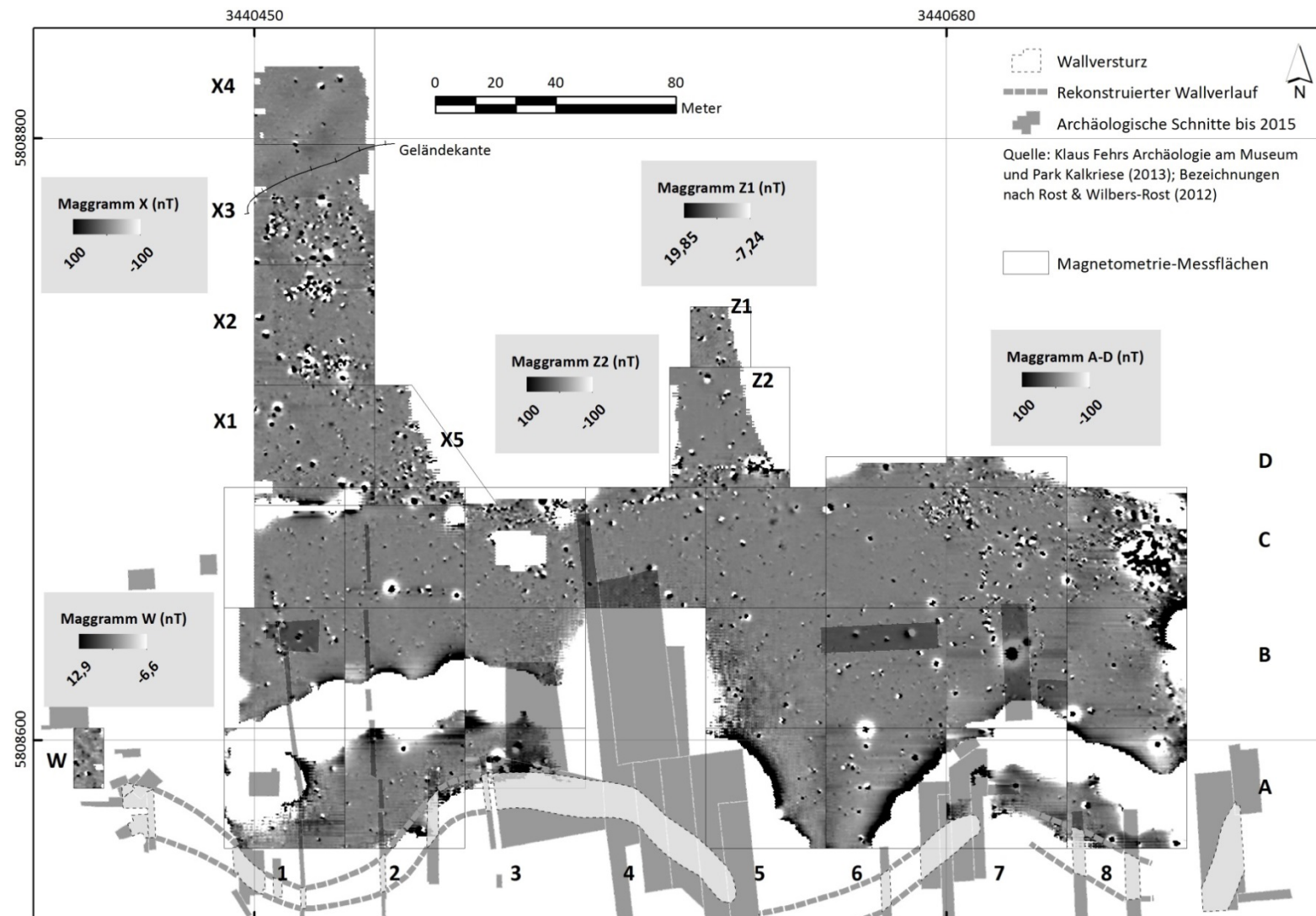
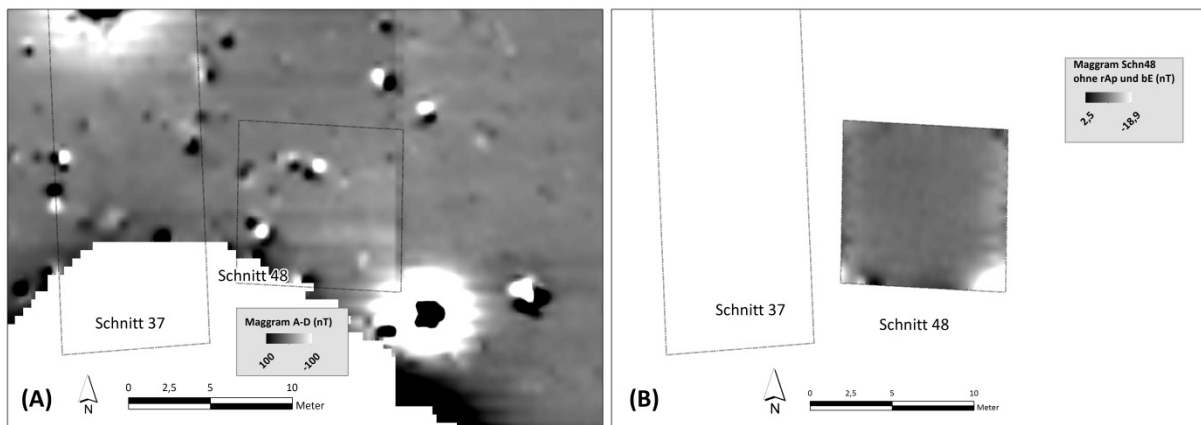


Abbildung 4.1: Ergebnisse der Magnetometerprospektion am Oberesch. Nach einer Kontrastverbesserung (s. Kap. 2.2.2 und Anhang D) wurde die voreingestellte Dynamik von  $\pm 100$  nT für alle Magnetogramme beibehalten.

Im Rahmen einer Grabung im Sommer 2015, bei der der Schnitt 48 angelegt wurde, wurde auch der Versuch unternommen, nachzuvollziehen, aus welchen Tiefenbereichen die Dipolhäufungen bzw. die Dipole stammen könnten. Dazu wurde die Fläche des Schnittes nach dem Abtrag des Oberbodens und der Plaggenauflagen noch einmal prospektiert. Der Gradiometer wurde dabei in der selben Höhe getragen, wie bei der Prospektion vor dem Anlegen des Grabungsschnittes (~50 cm ü. GOF). Es kam dabei heraus, dass die Dipole, zumindest für die Geländebereiche um den Schnitt 48, in den Oberböden und den Plaggenauflagen zu verorten sind (Abb. 4.2 (A) und (B)). Dies muss jedoch nicht zwangsweise für alle Geländebereiche gelten, zumal die Vergleichsfläche von 10x10 m gegenüber allen magnetometrisch erfassten Bereichen (> 4 ha) sehr klein und damit wenig repräsentativ ist.



**Abbildung 4.2:** (A) Magnetogramm A-D im Bereich des Schnittes 48 vor dem Entfernen der Plaggenauflage und (B) Magnetogramm des Schnittes 48 nach dem entfernen der Plaggenauflage. Der Magnetometer wurde bei beiden Messungen in der gleichen Höhe getragen.

Neben den von Gleyen unterlagerten Plaggeneschen findet man Dipolhäufungen auch im Bereich der (mittleren) Gleye und der Abschlammassen. Hier umschließt ein markantes, mehrgliedriges Band aus Dipolhäufungen die südlichen Abschlammassen im Grid X5 und im Norden der Grids C2 und C3 (Abb. 4.1). Dieses Band zieht sich weiter durch das nördliche Grid C4, wo es sich zu verengen scheint. Im südlichen Grid Z2 wird es wieder breiter bis es am südöstlichen Rand der mittleren Schneise mit einer großen, extremen Anomalie endet. Eine Detailbetrachtung dieser extremen Anomalie unter einer Streckung der Dynamik des Vertikalgradienten auf  $\pm 130$  nT lässt auf thermoremanente Magnetisierungen im Untergrund schließen (nicht dargestellt) (nach Fassbinder (2015: 87)).

Doch nicht nur thermoremanente Anomalien und Dipolanomalien sind in den Magnetogrammen des Oberesch auszumachen. Am südwestlichen Rand der Abschlammassen, die Grids X1 und X5 (Abb. 4.1) in WNW-OSO-Richtung schneidend, Isohypsenparallel und mitten durch die o. g. mehrgliedrige Dipolhäufung, verläuft eine erkennbare, schwach-negative Anomalie. Eine ähnliche, erkennbare negative Anomalie schneidet das Magnetogramm W in sehr ähnlicher Richtung. Es ist auffällig, dass sie in etwa der Flucht der nördlichen Kante des Wallversturzes und des rekonstruierten Wallverlaufes

liegt. Welche Bedeutung die negativen, linearen Anomalien am Oberesch haben bzw. in welchem Zusammenhang die Letztere mit dem Befund Wall steht, erschließt sich derzeit nicht.

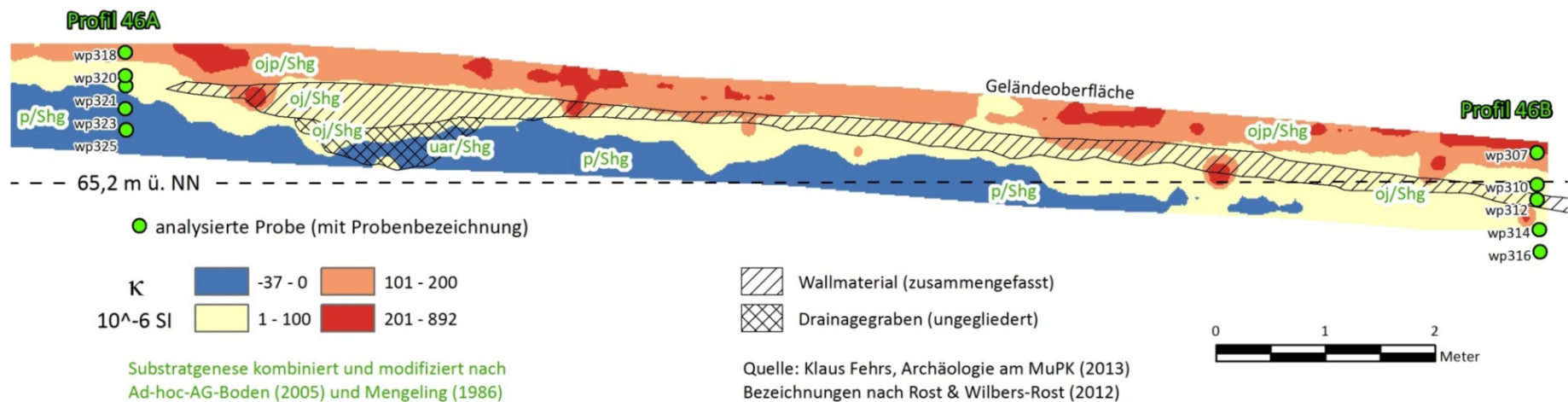
Neben den schwach-negativen, linearen Anomalien, treten in den Magnetogrammen des Oberesch auch vereinzelt schwach-positive Anomalien zweierlei Ausprägung auf. Zum einen rundliche, im Durchmesser von etwa 3 m, schwach-positive Anomalien in den Grids C3 und X1 (Abb. 4.1). Die Anomalie im Grid X1 liegt dabei genau in der Flucht der o. g. linearen, schwach-negativen Anomalie. Eine ganz andere Ausprägung zeigen sehr schwach-positive, große Anomalien in den Grids X3 und X4. Sie verlaufen in SW-NO-Richtung, nördlich einer deutlichen Geländekante und sind in ein fast Dipolfreies, auffällig ruhiges Umfeld eingebettet. Bis auf die 3 genannten ist für die Magnetogramme vom Oberesch eine außerordentliche Armut an ausließlich positiven Anomalien festzustellen.

Weitergehende Interpretationen magnetometrischer Befunde im vorliegenden schlachtfeldarchäologischen Kontext bedürfen einer umweltmagnetischen Verifikation/Falsifikation und werden zunächst nicht angestellt. Fehlende Vergleichsmessungen auf ähnlichen Plaggeneschstandorten einerseits und die grundsätzlich äußerst dünne Literaturbasis in Bezug auf die Anwendung der Magnetometrie auf antiken Schlachtfeldern andererseits, würden, zum gegenwärtigen Zeitpunkt, stark zur Spekulation tendieren. Die Kopräsenz jüngerer, magnetometrischer Befunde – mit solchen ist auf einer über zwei Jahrtausende alten, archäologischen Stätte zu rechnen – verstärkt den spekulativen Charakter weiterer Schlussfolgerungen. Deshalb soll im Folgenden, angelehnt an die formulierten Forschungsfragen, auf die Ergebnisse umweltmagnetischer Untersuchungen in zwei Grabungsschnitten und einem Vergleichsstandort eingegangen werden. Aus näherer, vergleichender Betrachtung der vorliegenden Böden und Substrate sollen dann weitere Schlussfolgerungen im Hinblick auf die Interpretation der Magnetometrie am Oberesch erfolgen. Dabei v. a. auf die Frage abzielend, weshalb die Magnetogramme so arm an schwach-positiven Anomalien sind und worauf die wenigen schwachen Anomalien zurückgeführt werden können.

## **4.2 Umweltmagnetische Untersuchungen an braunen Plaggeneschen**

### **4.2.1 VS und Ansprache der braunen Plaggenesche**

Im Schnitt 46 (s. Abb. 3.4), wo im Jahre 2011 von der Archäologie am Museum und Park Kalkriese der Wallversturz samt Drainagegraben geschnitten worden ist, fanden erste umweltmagnetische Untersuchungen statt. Hier wurde am Westprofil des Schnittes, in einem Raster von 10x10 cm, die Volumenssuszeptibilität mit dem MS2K-Sensor gemessen. Im oberen Teil der Abb. 4.3 werden die Ergebnisse dieser Messung als Kappagramm (interpolierte  $\kappa$ -Messungen) angezeigt. Außerdem wird hier anhand repräsentativer Profilbilder unter Einbezug, im Folgenden Kapitel dargestellter, Laboranalytik der Versuch unternommen, das Westprofil boden- und substratgenetisch anzusprechen.



Pedogenese südlich des Drainagegrabens



Foto: J. Bussmann (2011)

Pedogenese im Bereich des Drainagegrabens

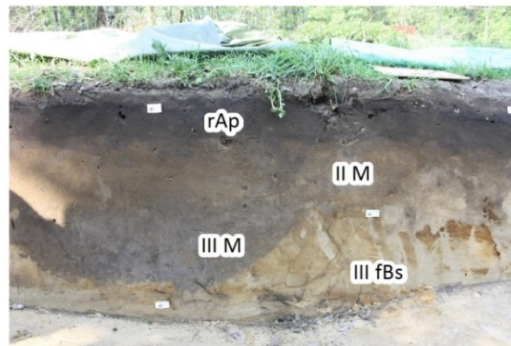


Foto: J. Bussmann (2011)

Pedogenese im Wallbereich

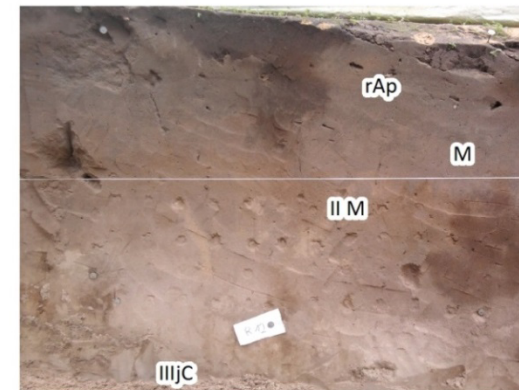


Foto: S. Hipp (2011)

Abbildung 4.3: (Oben) Kappagramm des Westprofils des Schnittes 46 mit substratgenetischer Interpretation (s. Text). (Unten) Repräsentative Fotografien aus unterschiedlichen Bereichen des Westprofils des Schnittes 46 mit pedogenetischer Ansprache.

Das Kappagramm in der Abbildung 4.3 (oben) zeigt eine deutliche Dreiteilung des Westprofils. Dabei nehmen in allen bemessenen Profilmereichen die  $\kappa$ -Werte mit der Tiefe ab, was zunächst ein deutlicher Hinweis auf einen nicht geogenen Ursprung magnetischer Partikel ist. Es werden im reliktschen Pflughorizont [rAp] hohe und moderate Volumenssuszeptibilitäten erreicht, wohingegen das dem Oberboden liegende Wallmaterial hauptsächlich durch schwache Magnetisierbarkeiten gekennzeichnet ist. Stellenweise, im Übergang zum Oberboden, wird das Wallmaterial durch hohe und moderate Magnetisierbarkeiten geprägt. Hier erkennt man im Kappagramm auch einige auffällige, zumeist runde Bereiche hoher Volumenssuszeptibilität. Diese Signale sind auf (Keramik- und/oder Ton-) Scherben im Wallmaterial zurückzuführen, die bei den in situ-Messungen zuweilen regelrecht aus dem Profil herausfielen. Da es sich bei dem Wallmaterial und der Verfüllung des Drainagegrabens um anthropogene und anthropogen-induzierte Umlagerungen handelt, werden sie im Folgenden substratgenetisch als anthropogen gekippte und abgelagerte Hangsande [oj/Shg] betrachtet (nach Rost & Wilbers-Rost (2012), Ad-hoc-AG Boden (2005) und Mengeling (1986)). Die schwachen Übernahmefähigkeiten des Wallmaterials können dabei auf geringe Anteile pedogener Superparamagnete oder Antiferromagnete (z. B. Goethit) aus unkompostierten Plaggen, die nach Rost & Wilbers-Rost (2012) Bestandteil des Walls gewesen sind, zurückgeführt werden (Fassbinder et al. 1990; Maher & Taylor 1988; Scheffer/Schachtschabel 2002). Die Verfüllung des Drainagegrabens ist im Kappagramm zweigeteilt (Abb. 4.3 (oben)). In der Kontaktzone zum hangenden Wallmaterial fällt sie durch schwache Volumenssuszeptibilitäten auf. An der Basis zeigt sie negative Werte und damit diamagnetische Eigenschaften. Bei Letzterem muss es sich um Verfüllungsmaterial handeln, das dem diamagnetischen Anstehenden sehr ähnelt oder gar daraus stammt. Substratgenetisch wird dieses diamagnetische Material als teils abgerutschte [uar/Shg ehemals p/Shg], reine Quarz-Hangsande interpretiert (nach Kirenski (1969) und Dearing (1999)). Diese Strata weisen offensichtlich den geringsten oder keinen anthropogenen Einfluss im betrachteten Profil auf, nicht zuletzt weil sie z. T. noch pedogenetische Merkmale zeigen (Abb. 4.3 (unten, mittleres Foto)). Besonders auffällig sind hier erkennbare Reste eines durch Sesquioxid-Anreicherungen geprägten Horizontes (Abb. 4.3 (unten, mittleres und linkes Foto)). Deshalb wird dieses Stratum bodengenetisch als fossiler Bs-Horizont [III fBs] angesprochen. Stratigraphisch und pedogenetisch ist diese Bildung älter als das Wallmaterial, weil sie im Bereich nördlich des Drainagegrabens, offenbar durch die Errichtung des Walles, aufgebrochen und gestört wurde (Abb. 4.3 (unten, mittleres Foto)).

In südlichen Bereichen des Schnittes fällt auf, dass die diamagnetischen, befundfreien Unterböden im Gesamtprofil am mächtigsten sind. Nach Norden hin tauchen sie unter das durch moderate  $\kappa$ -Werte gekennzeichnete Wallmaterial ab. Um dieser Auffälligkeit, die auf den ersten Blick Ergebnis kolluvialer Verlagerung der Straten mit  $\kappa$ -Werten  $>1$  infolge hoher Reliefenergie zu sein scheint, nachzugehen, wurden zwei Bodenprofile angelegt, beprobt und untersucht. Ein Bodenprofil stammte dabei aus der Bodensituation südlich des Drainagegrabens (Profil 46A in Abb. 4.3 (oben)). Als Kontrast dazu wurde

das nördlichste Bodenprofil innerhalb des Kappagramms ausgewählt, das auch eine Probe aus dem Wallmaterial beinhaltet (Profil 46B in Abb. 4.3 (oben)).

Im Gegensatz zum Westprofil des Schnittes 46 weist das Nordprofil des Schnittes 48 (zur Lage des Schnittes s. Abb. 3.4) so gut wie keine rezente Reliefenergie auf (Abb. 4.4). Lienemann & Tolksdorf-Lienemann (1992) postulieren vor dem Aufplaggen jedoch ein wesentlich lebhafteres Kleinrelief und ein vielfältigeres, ehemaliges Bodenmosaik auf der untersuchten Fläche. Hier wurden  $\kappa$ -Messungen aufgrund visuell nicht erkennbarer, archäologischer Befunde in einer anderen Auflösung angelegt: um die Stratigraphie noch genauer zu erfassen, wurde die Messauflösung auf 5x25 cm (Tiefe x Ost-/Westwert) gesetzt. Auf die Erzeugung eines Kappagramms wurde dabei verzichtet.

Ähnlich dem Westprofil des Schnittes 46 zeigt auch das Nordprofil des Schnittes 48 eine deutliche Dreiteilung der Volumenssuszeptibilitätsmessungen (Abb. 4.4). Dabei weist der reliktsche Pflughorizont [rAp] fast nur starke Magnetisierbarkeiten auf. Die dem Pflughorizont liegende Plaggenauflage ist durch eine scharfe Volumenssuszeptibilitätsgrenze nach oben gekennzeichnet und weist durchweg schwache Magnetisierbarkeiten auf. Anders als im Schnitt 46 zeigen die Unterböden im Nordprofil des Schnittes 48 überhaupt keine moderaten  $\kappa$ -Werte. Geschlossene diamagnetische Bereiche, bzw. ungestörte natürliche Substrate treten dabei nur im Osten des Nordprofils auf. Die Unterböden des westlichen Nordprofils zeigen allesamt schwache Volumenssuszeptibilitäten und fast keine diamagnetischen Strata. Diese locker-lagernden Hangsande [IC] weisen außerdem Straten sehr ähnlicher Volumenssuszeptibilitäten auf, was nach Soffel (1991: 31 und 74) auf eine Einregelung einzelner magnetischer Teilchen im Erdmagnetfeld und somit auf Sedimentationsremanenz deutet. Deshalb wird dieser Bereich substratgenetisch abgeschwemmten [uz/Shg] Hangsanden zugeordnet. Außerdem ist hier keine Schichtung zu beobachten, was wiederum darauf hindeutet, dass sich die Abschwemmung relativ schnell vollzog. Die Zeitstellung dieser Sedimentation ist unklar. Stratigraphisch ist sie in den Cv und somit in eine holozäne Bodenbildung eingebettet, deshalb kann hier eine ältere, glazifluviale Bildung zunächst ausgeschlossen werden. In wieweit sie im zeitlichen Bezug zu den Schlachtereignissen um Christi Geburt steht, muss noch geprüft werden. Die Volumenssuszeptibilität bestätigt jedenfalls die Ergebnisse von Lienemann & Tolksdorf-Lienemann (1992), die von einem lebendigen, zerrundeten Relief vor dem Plaggenauftrag berichten. Sie gibt außerdem Aufschluss darüber, weshalb die Senken und Furchen bzw. deren Verfüllungen in den Magnetogrammen (Abb. 4.1 und 4.2) nicht erkennbar sind: sie weisen offensichtlich einen viel zu niedrigen Volumenssuszeptibilitätskontrast zur umgebenden Bodenmatrix auf.

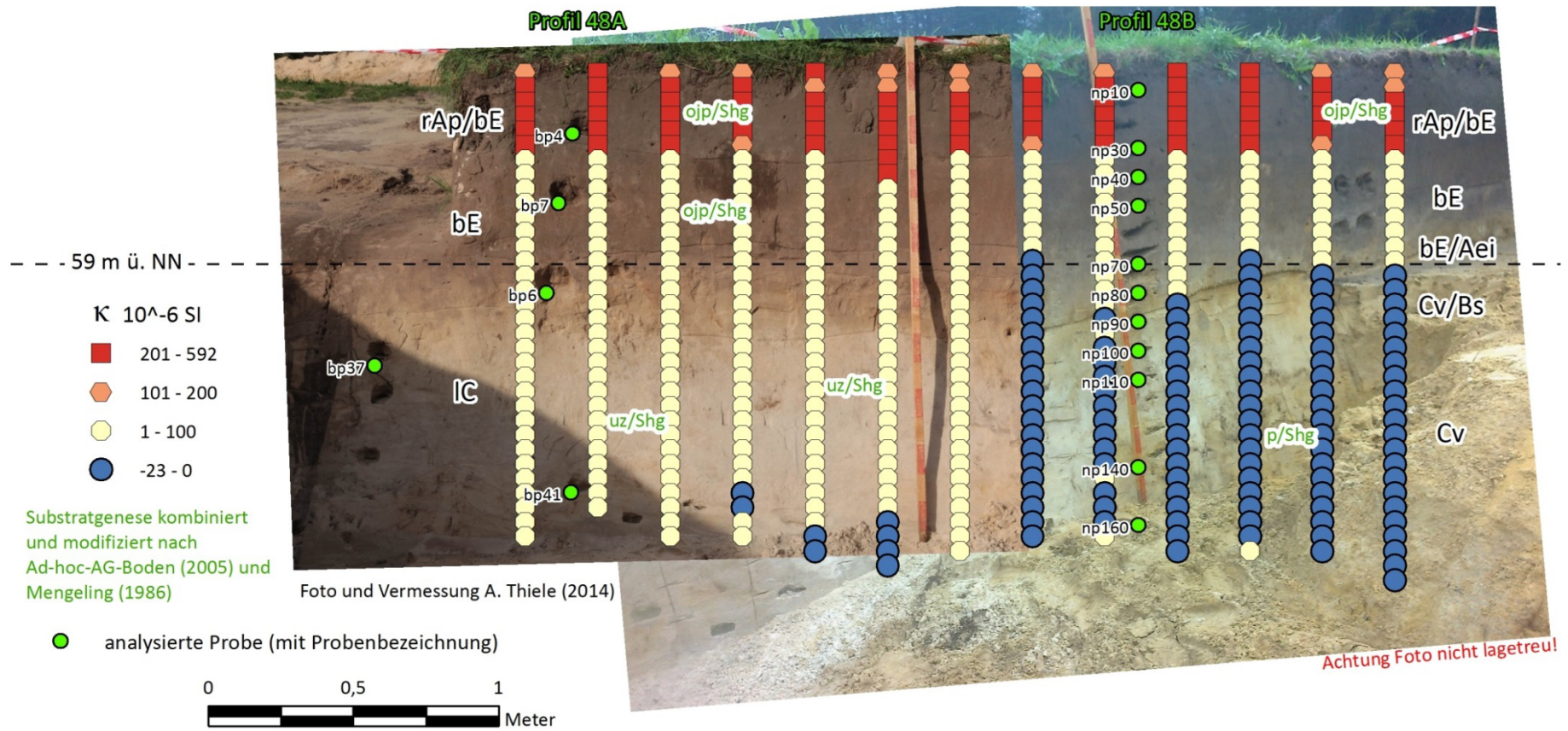


Abbildung 4.4: Kappmessungen, substrat- (in grün) und pedogenetische (in schwarz) Ansprachen am Nordprofil des Schnittes 48. Hinterlegt sind Fotos des Profils.



Die bodengenetisch als Plaggenauflagen [bE] angesprochenen (s. a. nächstes Kapitel), anthropogen-pflugverkippten Substrate [ojp/Shg], zeigen im Schnitt 48 schwache Magnetisierbarkeiten. Obwohl im Bereich des Schnittes ein Mittlerer Plaggensch, der von Gley unterlagert wird, auskartiert ist (Abb. 3.4), zeigen die Unterböden hier keine reduktomorphen Eigenschaften. Die hellrostfarbenen Hydro-morphiemerkmale weisen auf primär oxidative Bedingungen hin. Doch die teils intensive Manganfleckung der Unterböden (hier v. a. im Cv) belegt auch, zumindest zeitweilige, Staunässe (Ad-hoc-AG Boden 2005: 112-113) .

Angelehnt an die in-situ Volumenssuszeptibilitätsmessungen wurden auch im Schnitt 48 zwei Bodenprofile angelegt, beprobt und untersucht.

Am Vergleichsstandort Lechtinger Esch wurde ebenfalls direkt am Bodenprofil die Volumenssuszeptibilität ermittelt. Anders als am Oberesch, erfolgte die Messung nicht in einem Raster. Das Profil wurde von oben nach unten mit einem Tiefenabstand von etwa 2 cm an 3 unterschiedlichen Stellen (s. 3 Messreihen in Abb. 4.5) bemessen. In der Abbildung 4.5 sind Ergebnisse dieser Messung neben einem Profildfoto mit bodenkundlicher Ansprache (nach Mueller (2013)) dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass die gesamte pflugverkippte Plaggenauflage des Lechtinger Esch deutlich höhere  $\kappa$ -Werte zeigt, als die bE-Horizonte am Oberesch. Dabei sind die  $\kappa$ -Peaks auf den Tiefenniveaus von -0,5 bis -0,6 m und -0,8 bis -1 m auf unregelmäßig verteilte Tonscherben und/oder Ziegelreste zurückzuführen.

Die Plaggenauflagen [bE1 bis bE3] des Lechtinger Esch zeigen fast durchweg hohe  $\kappa$ -Werte. Lediglich der Übergang von bE2 zu bE3 ist durch moderate Volumenssuszeptibilitäten geprägt. Auch die M-Horizonte (aus der Abb. 4.5 nicht ersichtlich) zeigen hier, anders als am Oberesch, starke Magnetisierbarkeiten. Die C-Horizonte, die sich auf dem Tiefenniveau von etwa -1m mit M-Horizonten schichtartig abwechseln, weisen hingegen moderate Volumenssuszeptibilitäten auf. Sie scheinen beide verspült [os/Shg] worden zu sein und zählen somit zur anthropogenen/anthropogen-induzierten Substratgenese.

Schwache bis gar negative Magnetisierbarkeiten sind für die Reste der natürlichen Bodenbildung [fAh1, Bv und fAh2] gemessen worden. Diese, weitgehend ungestörten Bodenbereiche entsprechen den anthropogen-ungestörten bzw. wenig gestörten Substraten am Oberesch. So kann auch für den Lechtinger Esch festgehalten werden, dass die magnetischen Signale offensichtlich nicht geogenen Ursprungs sind.

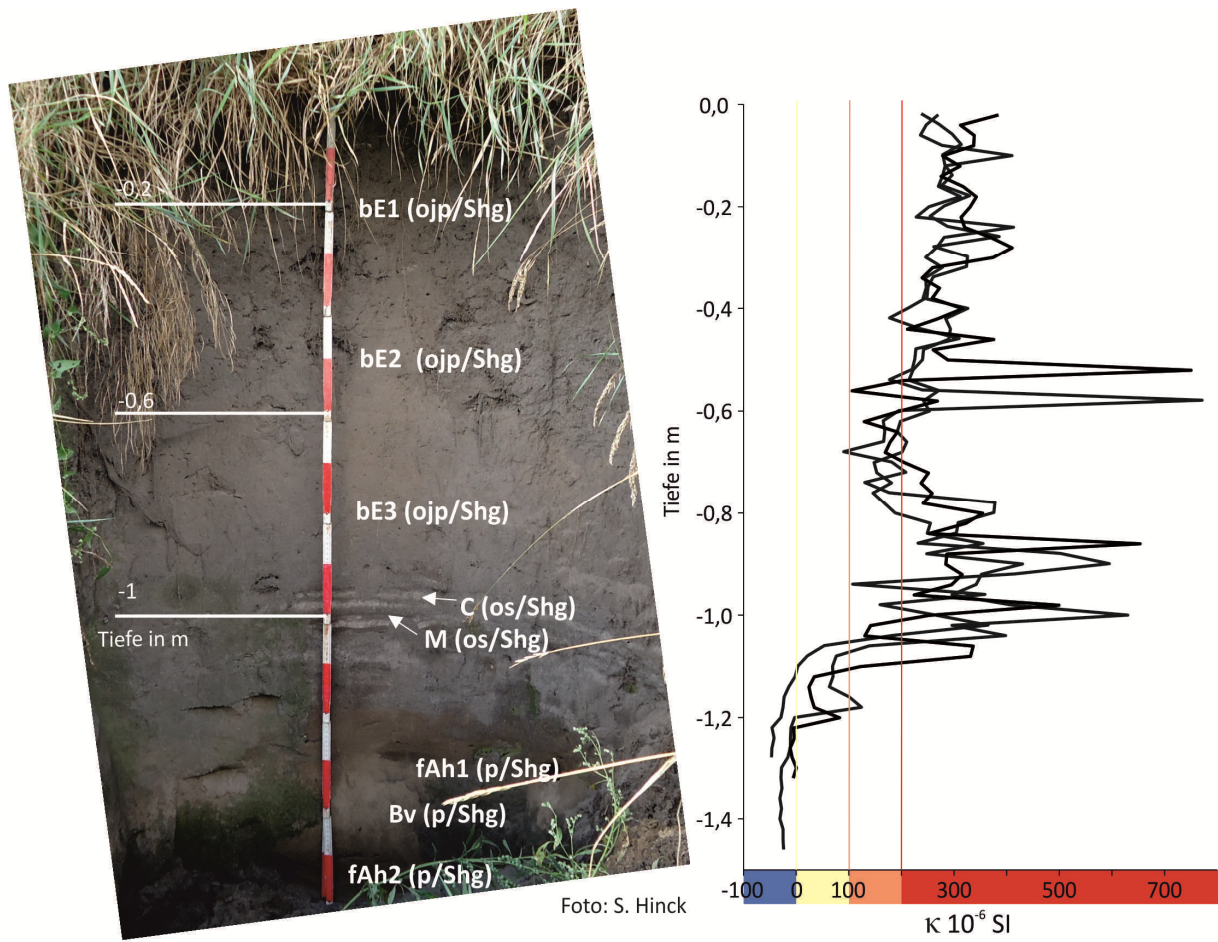


Foto: S. Hinck

Bodenansprache aus Mueller (2013)

In Klammern modifizierte Substratgenese nach Ad-hoc-AG Boden (2005) und Hinze (1979)

**Abbildung 4.5: (Links) Boden- und substratgenetische Ansprache des Plaggeneschprofils am Lechtinger Esch. Gegenübergestellt sind (rechts) die in-situ-VS-Messungen am Profil. Obwohl an 3 unterschiedlichen Stellen im Profil gemessen (s. Text), zeigen die  $\kappa$ -Werte ein sehr ähnliches Tiefenmuster und belegen ein weiteres Mal die hohe Reproduzierbarkeit und Robustheit dieses Suszeptibilitätsparameters.**

Grundsätzlich findet man an allen betrachteten Plaggenesch-Standorten und Profilen im hohen Maße anthropogen-überprägte und somit teils komplexe Boden- und Substratbildungen vor. Die diskutierten rAp, M und bE Horizonte enthalten, falls nicht anders genannt, Holzkohle (Stücke und/oder Flitter), Tonscherben und ggf. auch andere anthropogene Marker. Dabei sind natürliche, pedogene Merkmale der Bodenbildungen, insbesondere am Oberesch, nur stellenweise und in veränderter oder initialer Form vorhanden. Von einer Bodentypisierung wird deshalb an allen Standorten abgesehen. Aus umweltmagnetischer Perspektive wird eine reine boden- und substratgenetische Sicht der betrachteten Profile angestrebt. Der nächste Abschnitt widmet sich deshalb einer kombinierten Betrachtung der massenspezifischen und frequenzabhängigen Suszeptibilitätsparameter mit laboranalytischen Ergebnissen.

#### 4.2.2 MS, FMS und andere Laborkennwerte der braunen Plaggenesche

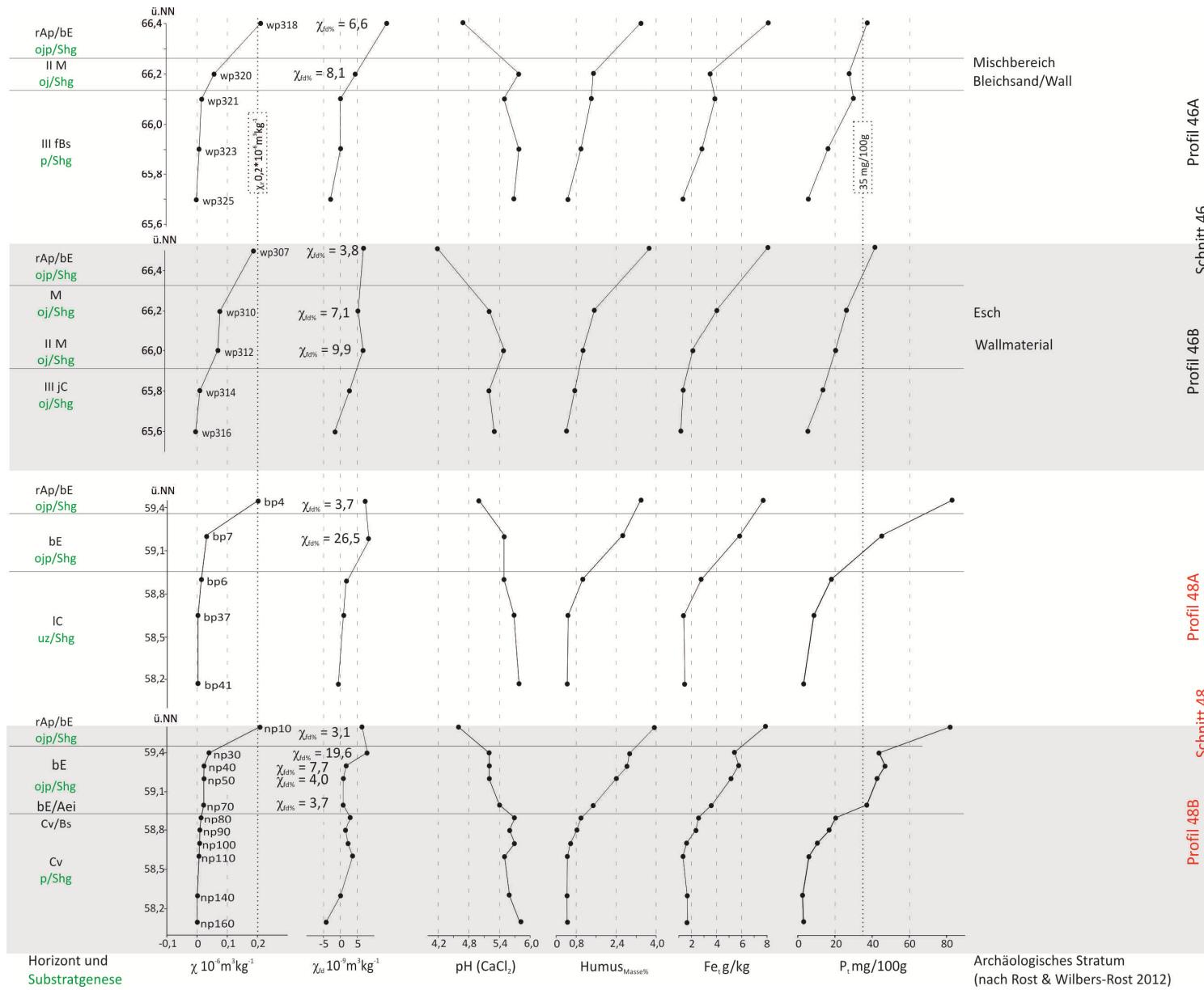
Die untersuchten Bodenprofile am Oberesch zeigen im Hinblick auf die Feinbodenart eine homogene Korngrößenverteilung. Dabei sind in beiden Schnitten die Feinsande mit mittleren Massenanteilen von 56 % dominant, gefolgt von Mittelsanden mit 33 % und Grobschluffen mit rund 4 % Massenanteil im Mittel. Alle anderen Fraktionen zeigen Werte von teils unter 3 Massenprozent im Mittel. Einige Proben aus dem Schnitt 48 fallen dabei zwar durch etwas höhere Mittelsandanteile (max. 38%) auf, sie zeigen jedoch keine signifikanten Unterschiede im Gesamtkorngrößenspektrum. Sodass die Korngrößenzusammensetzung aller Substrate am Oberesch im Ganzen der von Mengeling (1986: 68) geschilderten Geogenese eines verspülten, kalkfreien, überwiegend sortierten Flugsandes entspricht.

Anders als die Korngrößen und Kalkgehalte stellen die ermittelten Suszeptibilitätsparameter und andere, erhobene Laborkennwerte der Proben vom Oberesch ein differenzierteres Bild dar. In der Abbildung 4.6 werden die Kennwerte der Profile dargestellt und im Weiteren skizziert.

Die pH-Werte aller Bodenprofile am Oberesch nehmen mit der Tiefe zu, wobei sich die mäßig bis stark sauren Oberböden an der Grenze zwischen dem Austausch- und dem Aluminium-Pufferbereich befinden. Die mäßig bis schwach sauren Unterböden sind dagegen bereits in den Silikat-Pufferbereich einzuordnen (Ad-hoc-AG Boden 2005: 367-368).

Die größten Unterschiede innerhalb der betrachteten Schnitte sind in den Gesamtphosphorwerten zu beobachten. In den Oberböden verdoppeln sie sich nahezu von Schnitt 46 zu Schnitt 48. Dabei wird der Plaggenauflagen-Indikatorwert von 35 mg/100g P<sub>t</sub> in allen rAp Horizonten überschritten, weshalb diesen Horizonten die Bezeichnung /bE (für brauner Eschhorizont) nachgestellt wird. Das im Schnitt 46 unter dem rAp/bE liegende, von Rost & Wilbers-Rost (2012) als Esch angesprochene, dem Wallmaterial hangende, Stratum zeigt hingegen Gesamtphosphorwerte unterhalb des o. g. Grenzwertes. Deshalb wird es boden- und substratgenetisch nach Ad-hoc-AG Boden (2005) und Mengeling (1986) als Kolluvium [M] bzw. anthropogen gekippter Hangsand [oj/Shg] betrachtet.

Als Eschhorizonte können hingegen die im Schnitt 48 den rAp/bE-liegende Strata angesprochen werden, weil deren Gesamtphosphorwerte allesamt über dem Indikatorwert liegen. Das Profil 48B zeigt aufgrund der engeren Beprobung sogar ein für Plaggenesch typisches Muster der Gesamtphosphor-Gehalte (Eckelmann 1980: 35). Dabei ist es auch das einzige betrachtete Profil, das an der Basis des bE-Horizontes Merkmale einer Initialbodenbildung aufweist [bE/Aei und Cv/Bs].



**Abbildung 4.6: Massenspezifische Suszeptibilität, frequenzabhängiger Suszeptibilitätsverlust und bodenchemische Parameter der Bodenproben aller Profile aus den Schnitten 46 und 48 vom Oberesch (Abb. 4.3 und 4.4) im Vergleich. Eingetragen sind außerdem der Plaggenauflagen – Indikatorwert (s. Kap 3.2.2) sowie der eigens bestimmte Suszeptibilitätswert mit sicherer, remanenter Magnetisierung (s. Kap. 2.1.1.3).**

Die Initialhorizonte sind Hinweise darauf, dass auf diesem Tiefenniveau bereits seit längerer Zeit nicht gepflügt wurde. Bodengenetisch ist die Ansprache der bE-Horizonte an der betrachteten Hangposition sicher, denn es liegt eine nutzungshistorische Dokumentation vor: die Du Plat-Landesvermessung aus den Jahren 1784-1790 zeigt hier eine Eschfläche (Staatsarchiv Osnabrück 1994).

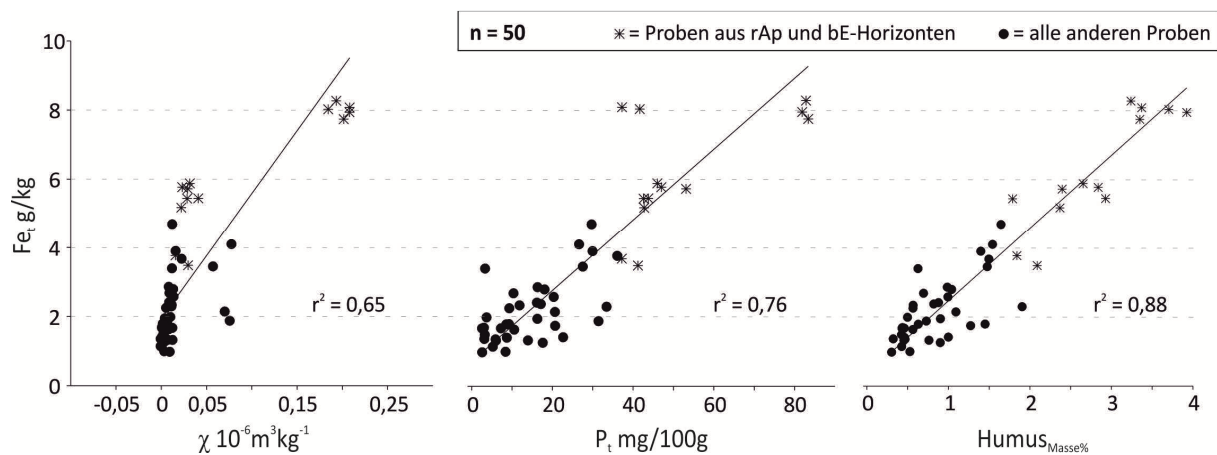
Eine Dreiteilung der  $\chi$ -Suszeptibilitätsparameter, wie sie bei der  $\kappa$ -Suszeptibilität (s. vorangegangenes Kapitel) beobachtet wurde, ist im Schnitt 46 zu verzeichnen. Dabei zeigen Proben aus Befunden hohe Frequenzabhängigkeiten der Suszeptibilität ( $\chi_{fd\%}$ ). Hier fallen, im Vergleich zu den liegenden Horizonten [III fBs und IIIfBs/jC], der archäologische Befund Wall [IIM] und das dem Befund hangende Kolluvium [M] auch durch höhere massenspezifische Suszeptibilitäten ( $\chi$ ) auf. Da der Wallkonstruktion nachweislich Plaggen zur Stabilisierung hinzugefügt wurden (Tolksdorf-Lienemann 2007; Wilbers-Rost et al. 2007; Rost & Wilbers-Rost 2012) kann diese Auffälligkeit in den Suszeptibilitätsparametern nach Fassbinder et al. (1990) und Maher & Taylor (1986) auf Anreicherungen feinkörnigen, pedogenen, magnetischen Materials aus den (nicht kompostierten) Plaggen zurückgeführt werden. Die Annahme einer nicht-geogen-bedingten Anreicherung magnetischer Partikel, die sich bereits im Vorfeld durch die in-situ-Volumensuszeptibilität andeutete, wird somit durch die Laborkennwerte bestätigt. Ferner stehen das Wallmaterial [II M] und das hangende Kolluvium [M], aufgrund ähnlicher Suszeptibilitätsparameter, offensichtlich im Zusammenhang. Denkbar wäre hier, dass das heutige Kolluvium [M] ursprünglich einen Teil des Walls bildete (z. B. seine Basis/bzw. seinen unteren Teil) und nach dem Kollabieren der Wallkonstruktion über den Wallversturz rutschte. Diese Möglichkeit muss jedoch noch mit der Archäologie diskutiert werden.

Das Stratum im Schnitt 46, das bei Feldmessungen diamagnetisches Verhalten aufwies (in Abb. 4.6 vgl. mit III fBs in Abb. 4.3 (unten links und mitte) und uar/Shg bzw. p/Shg in Abb. 3.4 (oben)), zeigt im Hinblick auf Suszeptibilitäts- und andere Laborparameter keine Auffälligkeiten.

Anders als im Schnitt 46 ist im Hinblick auf die Suszeptibilitätsparameter im Schnitt 48 keine richtige Dreiteilung erkennbar (Abb. 4.6). Obwohl die rAp/bE-Horizonte massenspezifische Suszeptibilitäten um  $0,2 \cdot 10^{-6} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$  zeigen, nimmt  $\chi$  bereits an der Oberkante der bE-Horizonte rapide ab. Bemerkenswerterweise bleibt  $\chi_{fd\%}$ , trotz dieser plötzlichen Abnahme, in den gesamten Plaggenauflagen relativ hoch. Zum Teil so hoch, dass die Werte der Proben np30 und bp7 nach Dearing et al. (1996) als Kontaminationen interpretiert werden müssen.

Andere Kennwerte, wie Humus und Gesamteisen ( $\text{Fe}_t$ ), nehmen im Gegensatz zu  $\chi$  stetig ab und sinken erst an der Basis der bE-Horizonte bzw. erst in den C-Horizonten auf niedrigste Werte im Profil. Die Gesamteisengehalte zeigen dabei keinerlei Zusammenhänge mit den Suszeptibilitätsparametern einerseits, andererseits eine Korrelation mit dem Gesamtphosphor und eine hohe Korrelation mit dem Humusgehalt (Abb. 4.7). Die letzten beiden Korrelationen deuten auf eine Gebundenheit des

Eisens und des Phosphors an Huminstoffe, die offensichtlich als Sorbenten fungieren, nicht zuletzt weil  $P_t$  gegen  $\text{Humus}_{\text{Masse}\%}$  (nicht dargestellt) mit  $r^2=0,82$  eine ebenfalls hohe Korrelation aufweist (Scheffer/Schachtschabel 2002). Es drängt sich daraus eine Annahme auf, dass nach Scheffer/Schachtschabel (2002: 332) die gemessenen Eisenkonzentrationen bei gegebenen pH-Werten auf organische bzw. organogene Fe-Komplexe zurück zu führen sind. Diese Vermutung ist im Hinblick auf die Ergebnisse der angewandten Gesteinsmagnetik in den Plaggeneschen (Kap. 4.2.3 und 4.3) interessant. Doch zuvor soll in den folgenden Absätzen auf den Vergleich der Ergebnisse vom Oberesch mit dem Plaggenesch-Standort Lechtinger Esch eingegangen werden. Da am Oberesch das Plaggenesch-Profil 48 B am dichtesten beprobt wurde, wird es zum Vergleich genutzt (Abb. 4.8).



**Abbildung 4.7:** Lineare Regressionen (RMA-Methode nach Hammer (2015)) der Parameter Gesamteisen gegen MS (links), Gesamteisen gegen Gesamtphosphor (in der Mitte) und Gesamteisen gegen Humusgehalt (rechts).

Die Bodenarten der Hangsande am Lechtinger Esch unterscheiden sich, aufgrund sehr ähnlicher Geogenese, von den Bodenarten der Hangsande am Oberesch vernachlässigbar-geringfügig (nach Mueller (2013); Mengeling (1986); Hinze (1979)). Mueller (2013) spricht für den Lechtinger Esch insgesamt 3 Eschhorizonte [+Ap] an, die allesamt ausgeprägtere Suszeptibilitätsparameter zeigen, als die Eschhorizonte [bE] des Oberesch-Profiles (Abb. 4.8). Mehr noch, alle anthropogen-beeinflussten Substrate des Lechtinger Esch zeigen hohe niederfrequente Volumenssuszeptibilitäten ( $\kappa_{lf}$ ), hohe frequenzabhängige Suszeptibilitätsverluste und relativ hohe massenspezifische Suszeptibilitäten. Die bE1 und M-Horizonte weisen messbare Frequenzabhängigkeiten der Suszeptibilität auf und damit auch messbare Anteile an Superparamagneten (SP). Auf eine pedogene Anreicherung der SP (> 6% nach Fassbinder & Bondar 2013) deuten dabei nur die Werte des bE3 Horizontes (Dearing et al. 1996). Diese Anreicherung könnte sowohl auf ein längerfristig ausgesetztes Aufplaggen und authigene Anreicherung deuten als auch ein anderes Quellgebiet der aufgebrauchten Plaggen aufzeigen.

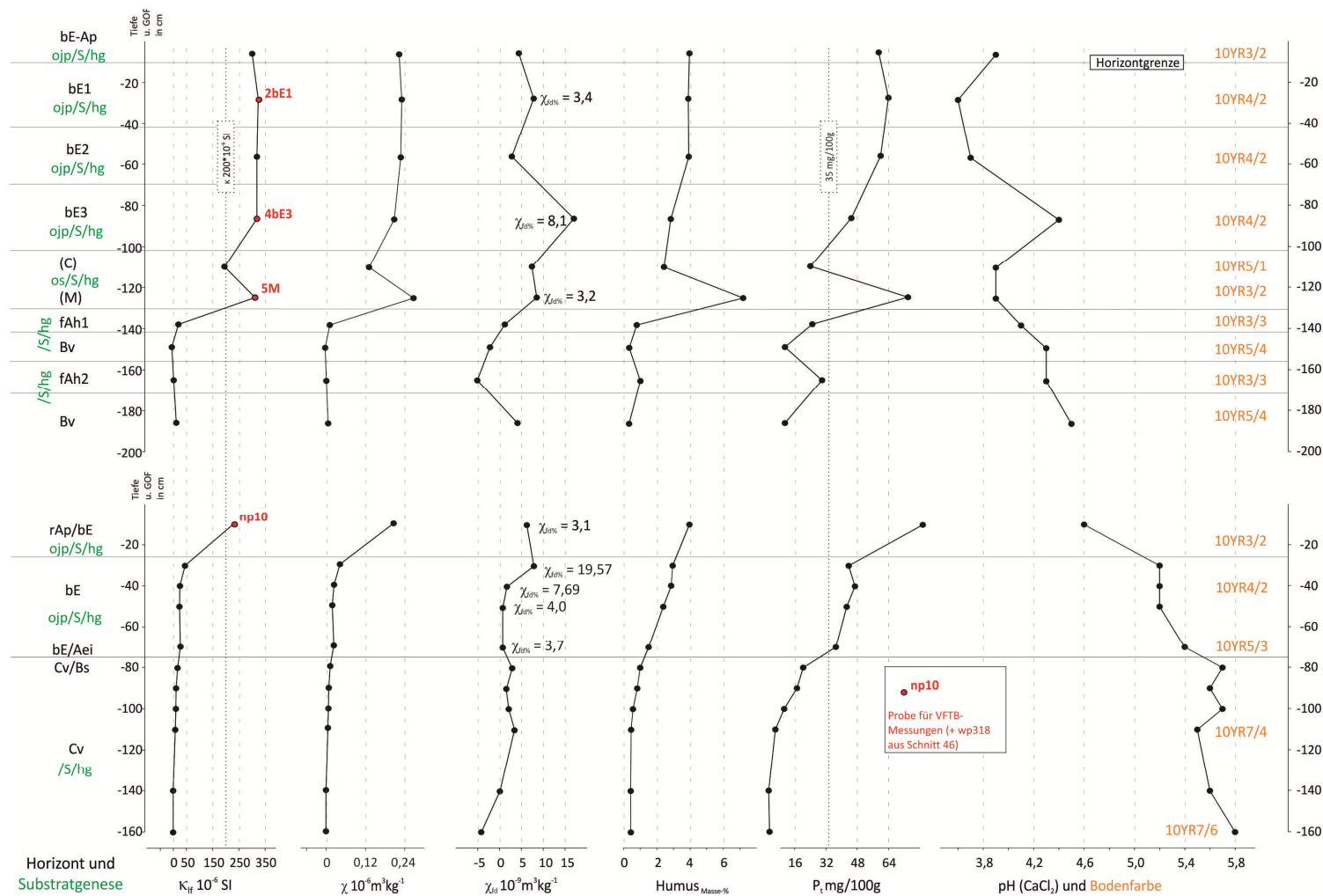


Abbildung 4.8: Vergleich von Suszeptibilitätsparametern und bodenchemischen Kennwerten der Plaggeneschprofile vom Lechtinger Esch (oben) (Kennwerte Humus, Gesamtphosphor, pH sowie Horizont- und Farbsprache aus Mueller (2013)) und Oberesch (unten). Eingetragen sind außerdem der Plaggenauflagen-Indikatorwert (s. Kap 3.2.2) sowie der eigens bestimmte Suszeptibilitätswert mit sicherer, remanenter Magnetisierung (s. Kap. 2.1.1.3). Rot sind Proben bzw. Horizonte gekennzeichnet, die weiteren, umweltmagnetischen Analysen unterzogen werden.

Der verspülte Kolluvialhorizont [M] des Lechtinger Esch zeigt im Vergleich der beiden Profile neben den höchsten Massenanteilen magnetischer Partikel ( $\chi$  in Abb. 4.8) auch die höchsten Humusanteile und Gesamtphosphorwerte. Grundsätzlich belegen die Suszeptibilitätsparameter im Vergleich, dass die bE-Horizonte des Lechtinger Esch bis zu zehnfach höhere Massenanteile an magnetischen Eisenverbindungen als die bE-Horizonte des Oberesch enthalten. Die Frequenzabhängigkeit der Suszeptibilität der Plaggenauflagen fällt jedoch am Lechtinger Esch teils niedriger aus.

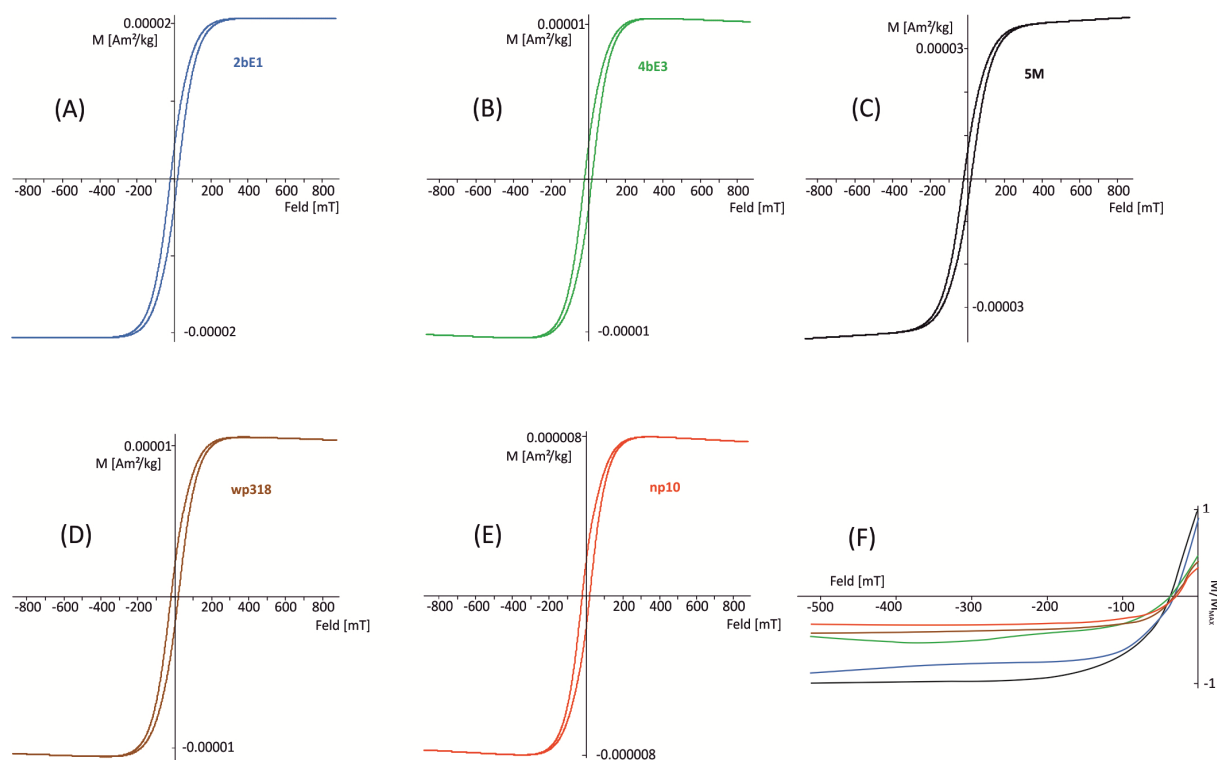
Der auffälligste Unterschied zwischen den betrachteten Plaggeneschstandorten ist jedoch in den pH-Werten zu verzeichnen (Abb. 4.8). Im Profil Lechtinger Esch liegen sie teils 4 Ad-hoc-AG Boden (2005: 367)-Einstufungen niedriger als im Schnitt 48 des Oberesch und damit in stark sauren bis sehr stark sauren Bereichen. Offensichtlich wird das Profil vom Oberesch, wenn auch grundsätzlich kalkfrei, temporär hoch anstehendem, carbonat- und sauerstoffreichem (oxidative Hydromorphie, Kap. 4.2.2) Grund- und/oder Hangwasser ausgesetzt, das zeitweilig vermutlich bis unter den rAp/bE-Horizont staut (s. a. scharfe Grenze der  $\kappa$ - und  $\chi$ -Suszeptibilitäten in Abb. 4.4, 4.6 und 4.8). Die carbonatreiche Geologie (Mengeling (1986) und Anhang E) im Einzugsgebiet des Vorfluters (Bach im Osten der Flur Oberesch in Abb. 3.4) und sein Entspringen in einer Sinterquelle (Lienemann & Tolksdorf-Lienemann 1992) untermauern die Annahme. In diesen deutlichen Unterschieden im Bodenwasserhaushalt und dem daraus folgenden, rezenten Bodenchemismus sind auch die Gründe für derart unterschiedliche Suszeptibilitätsparameter zu suchen. Doch welche Remanenzträger sind für die Auffälligkeiten in den magnetischen Eigenschaften und somit für mögliche Magnetfeldanomalien in den betrachteten, braunen Plaggeneschen verantwortlich? Bevor weitere Überlegungen bzgl. Mobilität und Anreicherung magnetischer Partikel in den Anthroposolen angestellt werden, sollen im nächsten Kapitel die magnetischen Minerale aus den Horizonten und/oder Straten mit hoher Suszeptibilität näher durchleuchtet werden. Dafür wurden insgesamt 10 Plaggenesch-Proben gesteinsmagnetisch (im VFTB) untersucht. 5 ausgewählte, repräsentative Proben vom Oberesch (2 Proben) und Lechtinger Esch (3 Proben, s. a. Abb. 4.8) werden im folgenden Kapitel im Detail betrachtet.

#### 4.2.3 Magnetominerale der Plaggenauflagen und ihre Domänenstruktur

Die magnetischen Hysteresen der Plaggenesch-Proben in der Abbildung 4.9 (A) bis (E) sind sich sehr ähnlich. Alle Proben sind nach etwa 300 mT magnetisch gesättigt und zeigen eine deutliche Dominanz ferrimagnetischer Minerale ohne paramagnetische Anteile. Allein die Hysterese der Probe 5M zeigt ein positives para-/diamagnetisches Gefälle. Die Gestalten und Formen der Hysteresekurven deuten außerdem auf eine Mischung aus unterschiedlichen magnetischen Korngrößen, denn sie zeigen einen ‚*pseudosingle domain*‘ (PSD)-Typus (Tauxe et. al 2002) einerseits aber auch eine ‚*pot-bellied*‘-Gestalt andererseits (Fabian 2003).



## 4 Ergebnisse und Diskussion



**Abbildung 4.9:** Hysterese- ((A) bis (E)) und „Backfield“-Kurven (F) repräsentativer Proben aus den untersuchten Plaggenauflagen. Alle Hysteresen sind nicht reduziert. Die „Backfield“-Kurven sind normalisiert (Magnetisierung/Maximal-Magnetisierung) und werden anhand der Farbe der jeweiligen Probe zugeordnet.

**Tabelle 4.1:** Ausgewählte magnetische Parameter und domänenstrukturabbildende Ratios der Proben aus den Plaggenauflagen. Außerdem sind alle, aus der 2. Ableitung nach Leonhardt (2006) automatisch errechneten, Curie-Temperaturen ( $T_{C1}$ ,  $T_{C2}$ ...) für die jeweilige Probe abgetragen. Zuletzt werden Munsel-Farben der Proben vor und nach den thermomagnetischen Messungen (M/T) dargestellt.

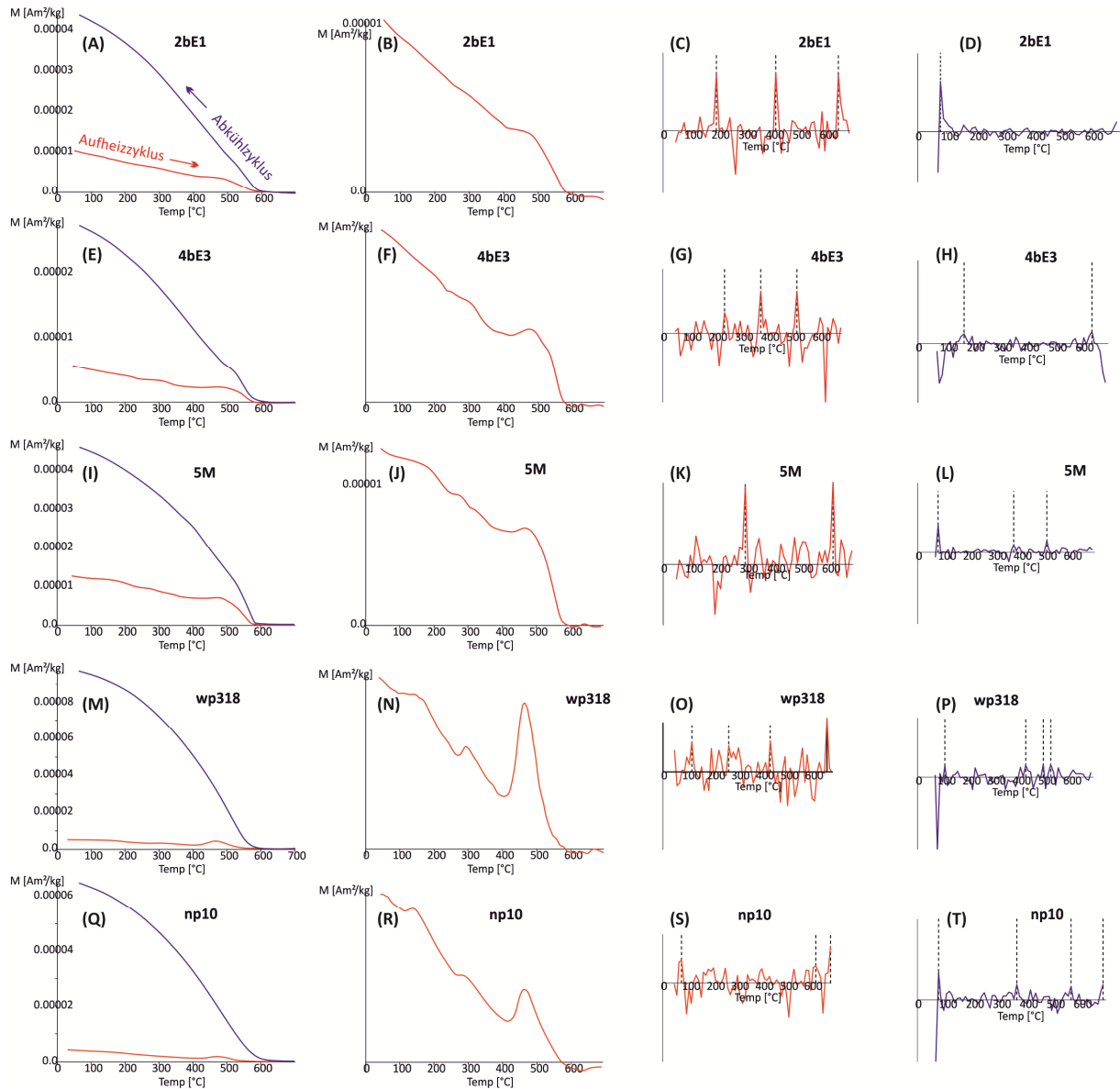
	2bE1	4bE3	5M	wp318	np10
$\chi_{fd}\%$	3,4	8,1	3,2	6,6	3,1
$M_S$ (e-005 Am <sup>2</sup> /kg)	2,12	1,08	3,56	1,1	0,8
$M_{RS}$ (e-005 Am <sup>2</sup> /kg)	0,4	0,23	0,65	0,23	0,18
$M_{RS}/M_S$	0,2	0,22	0,18	0,21	0,21
$B_C$ (mT)	16,5	17,4	16,68	15,48	16,88
$B_{CR}$ (mT)	33,65	36,8	37,01	32,12	29,77
$B_{CR}/B_C$	2,04	2,11	2,22	2,07	1,76
$T_{C1}$ ; $C_2$ ; $C_3$ ; $C_4$ Heiz. (°C)	418; 198; 648;	379; 519; 239;	620; 300; -; -	668; 438; 118;	687; 77; 627; -
(Methode: 2. Ableitung)	-	-	-	268;	-
$T_{C1}$ ; $C_2$ ; $C_3$ ; $C_4$ Kühl. (°C)	454; 104; 514;	684; 74; -; -	105; 85; -; -	500; 530; 430;	79; 689; 369;
(Methode: 2. Ableitung)	-	-	-	110	569
Bodenfarbe vor M/T-Messung	10YR 4/2	10YR 4/2	10YR 3/2	10YR 3/2	10YR 3/2
Bodenfarbe nach M/T-Messung	2,5Y 8/3	2,5Y 8/3	2,5Y 2/1	2,5YR 4/8	2,5YR 4/8
(Oben primär; unten sekundär)	2,5Y 2/1	2,5Y 2/1	2,5Y 7/6	2,5YR 2/1	2,5YR 2/1

Die ‚Backfield‘-Messungen in der Abbildung 4.9 (F) zeigen, trotz unterschiedlich hoher Ausgangsmagnetisierungen der Proben, ähnliche Remanenzkoerzitivkräfte ( $B_{CR}$ ) (s. a. Tab. 4.1). Sie sind alle vergleichsweise hoch, denn der Nulldurchgang aller Koerzitivkraftkurven liegt um 30 mT. Dies ist ein deutliches Zeichen für einen oder mehrere hartmagnetische Remanenzträger. Auch hier fällt wieder die Probe 5M auf, die bei höchster Ausgangsmagnetisierung, die höchste Remanenzkoerzitivkraft von über 37 mT zeigt.

Bereits die Hysterese- und Koerzitivkraftparameter (Abb. 4.9 und Tab. 4.1) belegen dominante Remanenzträger in allen Proben, die nicht dem Magnetit-Typ zugeordnet werden können (nach Dunlop 2002a). Sie zeigen gesteinsmagnetische Eigenschaften, die für die Dominanz des Magnetit-Counterparts sprechen, nämlich für das ferrimagnetische Eisensulfid Greigit ( $Fe_3S_4$ ) (Roberts 1995; Roberts et al. 2011). Die in der Tabelle 4.1 abgetragenen Ratios aus Sättigungsremanenz ( $M_{RS}$ ) zu Sättigungsmagnetisierung ( $M_S$ ) sowie die Ratios aus Remanenzkoerzitivkraft ( $B_{CR}$ ) zu Koerzitivkraft ( $B_C$ ) bescheinigen den Greigiten aus Plaggeneschen, wie bereits aus der Hystereseform gefolgert, ‚pseudosingle domain‘- bzw. PSD-Status (Day et al. 1977; s. a. Abb. 4.11). Auffällig ist, dass im Hinblick auf Fabian’s (2003) additive Gestalt-Parameter keine der Greigit-Hysteresen eine nach Roberts (1995) für SD-SP-Greigitmischungen typische ‚wasp-waisted‘-Gestalt zeigt.

Einen endgültigen Beleg für Greigit als dominanten Remanenzträger liefern thermomagnetische Messungen, die in der Abbildung 4.10 dargestellt sind. Alle Aufheizkurven (Abb. 4.10 (B), (F), (J), (N) und (R)) zeigen – mehr oder weniger deutlich – einen Bruch und einen geringen Anstieg der Magnetisierung zwischen 200 und 300°C. Hier reagiert der ferrimagnetische Greigit auf die thermische Einwirkung. Der Abfall der Magnetisierung zwischen 320 und 460°C markiert dabei seine Curie-Temperatur ( $T_C$ ) (Roberts 1995; Roberts et al. 2011; Dunlop & Özdemir 1997). Danach findet ein zweiter, markanterer Anstieg der Aufheizkurve statt. Dieser Anstieg und der folgende Magnetisierungs-Peak kennzeichnen eine Transformation der Greigitphase zu Magnetit. Nach dem Peak fällt die Magnetisierung zwischen 480 und 580°C abrupt in Richtung 0 und markiert den Curie-Punkt der entstandenen Magnetitphase (Dunlop & Özdemir 1997). Weiterhin durchschreitet die Aufheizkurve sogar die Nullmagnetisierung bei etwa 580°C. An diesem Punkt wird die Kompensationstemperatur (Pauthenet 1958) der ferrimagnetischen Verbindung in der Probe erreicht, bei der es zu einer Richtungsumkehr der Gesamtmagnetisierung kommt (Hilzinger & Rodewald (2013) nach Cullity & Graham (2009)). Die Kühlkurven (Abb. 4.10 (A), (E), (I), (M) und (Q)) zeigen letztlich, dass nach dem Aufheizen der Proben auf 700°C die dominanten, ferrimagnetischen Ausgangs-Greigite zum großen Teil zerstört wurden bzw. zur neu entstandenen Magnetitphase transformiert sind. Hierbei fallen die Lechtinger Esch-Greigite 2bE1 und 4bE3 auf, weil sie nach dem Aufheizen vollständig zerfallen und offensichtlich gänzlich zu Magnetit transformieren (Abb. 4.10 (D) und (H)).

#### 4 Ergebnisse und Diskussion



**Abbildung 4.10:** Thermomagnetische Kurven der ausgewählten Proben aus den Plaggenauflagen (jeweils eine Probe pro Zeile). In der ersten Spalte sind Aufheiz- und Abkühlkurven zusammen dargestellt. Die 2. Spalte zeigt nur die Aufheizkurve. In der 3. Spalte ist die 2. Ableitung der Aufheizkurve mit den automatisch errechneten Curie-Temperaturen (gestrichelte Linien) dargestellt. Die 4. Spalte zeigt die 2. Ableitung der Abkühlkurve mit den automatisch kalkulierten Curie-Temperaturen des Abkühlzyklus (s. a. Tab. 4.1).

Die Aufheizkurven und die aus der 2. Ableitung der Aufheiz- und Kühlkurven automatisch errechneten Curie-Temperaturen ( $T_{C1}$  bis  $T_{C4}$  in Tab. 4.1, s. a. Abb. 4.10) deuten neben der dominanten ferri-magnetischen Ausgangsphase Greigit eine weitere magnetische Ausgangsphase an. Am deutlichsten sieht man das Auftreten dieser subdominanten Phase in den Proben 5M, wp318 und np10. Deren Aufheizkurven (Abb. 4.10 (J), (N) und (R)) zeigen bei etwa 90 bis 120°C eine Erhöhung der Magnetisierung, was der Curie-Temperatur des Goethits ( $\alpha$ -FeOOH) entspricht (Dunlop & Özdemir 1997). Die rötliche Färbung der Oberesch-Proben nach den thermomagnetischen Messungen (Tab. 4.1) bekräftigt das Vorhandensein von Goethit, der nach thermischer Einwirkung zu Hämatit transfor-

miert (Scheffer/Schachtschabel 2002). Bemerkenswert ist dabei, dass die Bodenfarben der Proben vom Lechtinger Esch hingegen nach thermomagnetischen Messungen immer noch Goethit-Farben zeigen (Tab. 4.1). Hier kommt es während des Aufheiz- und Kühlzyklus anscheinend nicht zur Transformation von Goethit und somit nicht zu einer Bildung des roten Hämatits. Grund dafür ist vermutlich das Fehlen von (Kapillar-) Wasser in den Proben des Lechtinger Esch, das für die Transformation benötigt wird (nach Mdl. Mitt. N. Petersen (2014)).

Weiterhin kann Goethit eine potentielle Quelle für magnetische Nanopartikel (SP) sein und zur Frequenzabhängigkeit der Suszeptibilität der Plaggenesch-Proben beisteuern (Till et al. 2015). Dies würde die hohen Frequenzabhängigkeiten fast aller Proben bei fehlenden ‚*wasp-waisted*‘-Hysteresen des dominanten Greigits erklären. Anders formuliert: es ist nicht (nur) der dominante Remanenzträger Greigit, der eine Frequenzabhängigkeit der Suszeptibilität produziert, sondern hauptsächlich der anti-ferromagnetische Goethit.

Mit hoher Wahrscheinlichkeit kann dem gesteinsmagnetisch-detektierten Goethit eine hydrolytisch-pedogene Entstehung nach Scheffer/Schachtschabel (2002) und Fassbinder & Bondar (2013) unterstellt werden. Ein Vorhandensein dieses Eisenoxids ist anhand der Bodenfarbe in Horizonten unter den Plaggenauflagen sowohl am Lechtinger Esch, als auch am Oberesch stark zu vermuten (s. Munsell-Farben in Abb. 4.8) (nach Scheinost & Schwertmann (1999)). In diesen Horizonten scheint der Goethit, ohne die ferrimagnetische Greigit-Phase, wenig zur Volumensuszeptibilität, gleichwohl aber ein wenig zum frequenzabhängigen Suszeptibilitätsverlust ( $\chi_{fd}$ ) des Bodens beizutragen, denn die anthropogen wenig oder gar nicht gestörten Bereiche zeigen, trotz Goethit-assoziiertes Bodenfarben, schwache oder gar negative Magnetisierbarkeiten bei teils messbaren Suszeptibilitätsverlusten (Abb. 4.8).

Der umweltmagnetische Befund, der als Ergebnis in gut durchlüfteten, sandigen Plaggenauflagen ein, eigentlich an anoxisches Milieu geknüpft, ferrimagnetisches Eisensulfid erbrachte, ist zunächst verwunderlich. Deshalb sollen im kommenden Kapitel erste Überlegungen zur Bildung solcher Magnetominerale in den Plaggenauflagen angestellt werden. Außerdem soll im Hinblick auf die Dynamik ferrimagnetischer Phasen auf Plaggeneschstandorten darauf eingegangen werden, warum die bE-Horizonte am Oberesch viel niedrigere, massenspezifische Suszeptibilitäten aufweisen als die Plaggenauflagen am Lechtinger Esch. Danach werden die Auswirkungen o. g. Befunde auf die Magnetometerprospektion auf Plaggeneschstandorten diskutiert.

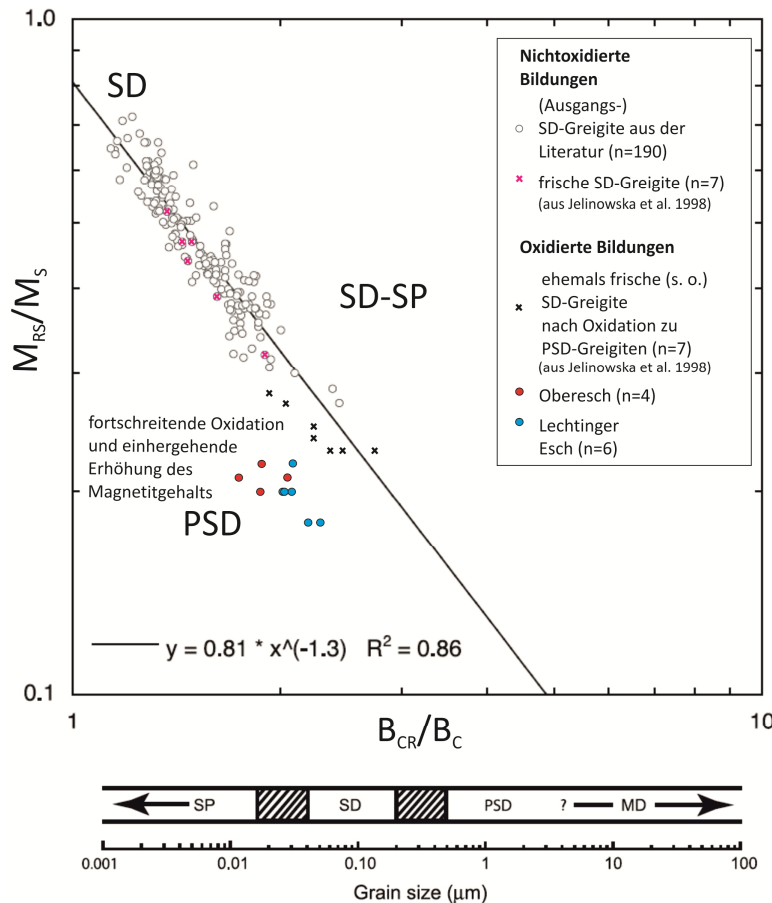
### 4.3 Zur Herkunft und Dynamik der Magnetominerale in braunen Plaggeneschen

Zum ersten Mal wurden braune Plaggenesche umweltmagnetischen Untersuchungen unterzogen. Ebenfalls zum ersten Mal wurden ferrimagnetische PSD-Greigite in sandigen, gut durchlüfteten Oberböden nachgewiesen. Die im Überblicksartikel von Roberts et al. (2011) dokumentierten, natürlichen,

thermal-stabilen Greigite zeigen in Domänenstatusabbildungen allesamt eine starke Beziehung zwischen SD-SP Mischungen und grundsätzlich SD-ähnliches Verhalten (s. Nichtoxidierte Bildungen und modellierte Regression in Abb. 4.11). Dieses magnetische Verhalten führen Roberts et al. (2011) auf die magnetokristalline, uniaxiale Anisotropie natürlicher Greigite zurück. Eine vergleichende Betrachtung der Plaggenesch-Greigite (s. Abb. 4.11 Oxidierte Bildungen) mit der globalen Zusammenstellung natürlicher (Ausgangs-) Greigite aus Roberts et al. (2011) in einem  $M_{RS}/M_S$  gegen  $B_{CR}/B_C$ -Plot (vgl. mit Day et al. (1977)) enthüllt, dass die in vorliegender Arbeit ermittelten Plaggenesch-Greigite außerhalb der modellierten Mischkurve liegen und somit eine eigene Gruppe bilden. Mehr noch, sie liegen in einem Domänenstatus vor, in dem bisher noch nie natürliche Greigite gemessen wurden.

Das Fehlen vergleichbarer Messungen aus der Literatur und eine niedrige Fallzahl der vorliegenden Plaggenesch-Eisensulfide macht eine hinreichende Interpretation der Ergebnisse ohne zusätzliche methodische Absicherungen schwer. Weiter kommt erschwerend hinzu, dass natürliche Greigite sich oft als Träger komplexer magnetischer Signale erweisen, weil variable Mineralmischungen unterschiedlicher Korngröße eine breite Palette magnetischer Eigenschaften produzieren können. Dies führte u. a. dazu, dass für ferrimagnetische Greigite noch keine robusten Korngrößenabschätzungen bzw. Domänenstatusabbildungen vorliegen (Hoffmann 1992; Roberts et al. 2011). Weshalb folgende Ausführungen zur Entstehung und Dynamik ferrimagnetischer Greigite in Plaggenauflagen und die Modifikationen des  $M_{RS}/M_S$  gegen  $B_{CR}/B_C$ -Plots von Roberts et al. (2011) (Abb. 4.11) zunächst als Hypothesen zu behandeln sind.

Es ist kaum vorstellbar und aus der Literatur schwer ableitbar, wie es zur in-situ-Genese und Anreicherung des Greigits in den betrachteten Eschauflagen kommen konnte. Zwar berichten Stanjek et al. (1994) von einer biogenen Bildung von SD-Greigiten im Unterboden bzw. Reduktionshorizont eines Auengleys in einer schwefelreichen Umgebung, aber an beiden betrachteten Plaggeneschstandorten findet man weder eine schwefelreiche Geologie, noch reduktive Verhältnisse vor. Und auch die magnetischen Eigenschaften der Plaggenesch-PSD-Greigite unterscheiden sich signifikant von den biogenen SD-Greigiten von Stanjek et al. (1994) (nach Fassbinder & Stanjek (1994)). Die bodenkundliche Grundlagenliteratur ihrerseits sieht für Greigite, ebenso wie Stanjek et al. (1994), eine anaerobe, biogene Entstehung in Böden und Sedimenten vor (Scheffer/Schachtschabel 2002: 29 und 322). Schließlich postulieren auch Roberts et al. (2011) für die Bildung sedimentärer Greigite, als Vorstufe des Pyrits ( $FeS_2$ ) (Benning et al. 2005), eine anoxische, sulfatreduzierende Sedimentumgebung. Die authigene Bildung der Greigite in pflugverkippten, durchlüfteten Plaggeneschen ist somit auszuschließen.



**Abbildung 4.11:** Ein aus Hysterese- und „Backfield“-Ratios erstellter Day-Plot (oben) (nach Day et al. (1977)) aus Roberts et al. (2011: 11 (d), modifiziert) gibt Auskunft über den Domänenstatus von Greigiten aus einer globalen Zusammenstellung (offene Kreise). Im Vergleich dazu sind die Plaggenesch-Greigite eingezeichnet (rot und blau eingefärbte Kreise). Ebenfalls zum Vergleich sind frische Greigite (Kreise mit violetterm Kreuz) und ihre Oxidationsbildungen (schwarze Kreuze) aus Jelinowska et al. (1998) abgetragen. Unten sind derzeit beste Korngößenabschätzungen für magnetisches Domänenverhalten der Greigite dargestellt (Roberts et al. 2011: 8 (g)). Weitere Informationen zur Abbildung befinden sich im Text.

Denkbar wäre hingegen eine Bildung des ferrimagnetischen Schwefeleisens bereits während der Kompostierung, noch vor der Aufbringung des Materials aufs Feld. Im Komposthaufen oder Misthaufen, wo lokal und zeitweilig sauerstofffreie Verhältnisse herrschen können (mdl. Mitt. K. Mueller (2016)), kann es an der Nahtstelle zwischen oxidativen und anoxischen Bedingungen, im Organik reichen Milieu, zum Wachstum mikrobieller Greigit-Produzenten kommen (Konhauser 2007). So kann hier die Bildung des Greigits durch Mikroorganismen herbeigeführt worden sein (Roberts et al. (2011) nach Berner (1984), Wilkin & Barnes (1996) und Benning et al. (2000)). Eine weitere, vermutlich wahrscheinlichere Möglichkeit, ist die Biomineralisierung von SD-Greigit-Magnetosomen durch magnetotaktische Bakterien (s. a. „*pot-bellied*“-Hysteresen der Plaggenesch-Greigite) im Rahmen des reduktiven, mikrobiellen Abbaus organischer Substanz innerhalb des Komposthaufens (nach Bazylnski et al. (1993), Stanjek et al. (1994) und Schäfer et al. (2010) und mdl. Mitt. K. Mueller (2016)). Das Eisen, das bei der Greigitbildung mit einbezogen wird, ist aufgrund der hohen Korrelation des Gesamteisens mit dem Humusgehalt (s. Kap. 4.2.2 und Abb. 4.7), allem Anschein nach, organogenen Ursprungs (Scheffer/Schachtschabel 2002: 332). Sulfate, die bei der mikrobiellen Reduktion ebenfalls gebraucht und umgebaut werden, können aus verschiedenen Quellen kommen: hauptsächlich aus S-reicher organischer Substanz (Scheffer/Schachtschabel (2010) nach Zucker et al. (1986)), außerdem aus den von der Nordsee kommenden Niederschlägen mit relativ hohem Schwefelsalzgehalt (Mansfeldt 1994) und sogar aus schwefelarmen, feinsandigen, anorganischen Komponenten der Rasensoden (nach Langer et al. (o.J.)). Dabei ist grundsätzlich zu beachten, dass die sulfatreduzierenden und Grei-

git-biomineralisierenden Mikroorganismen sehr geringe Mengen an den genannten Ausgangstoffen brauchen. Dementsprechend bewegen sich auch die magnetischen Endprodukte in sehr geringen Mengen. Magnetische Verfahren sind aber derart sensitiv, dass auch geringste Volumen- und Massenanteile solcher Partikel erfasst werden (Faßbinder 1994).

Bei all den berechtigten Zweifeln an o. g. Überlegungen kann natürlich auch nicht gänzlich ausgeschlossen werden, dass die SD-Greigite nicht auf dem Komposthaufen angereichert wurden, sondern aus Plaggen-Quellgebieten mit hydromorphen Humusformen stammen könnten. Da jedoch ein Nachweis von natürlich gebildeten, magnetischen Eisensulfiden in Feucht- und Nasshumusformen in den betrachteten Naturräumen bisher ausgeblieben ist, wird diese Möglichkeit hier nicht weiterverfolgt.

Für die Umwandlung zum PSD-Status der, bei der Kompostierung angereicherten, biogenen SD-Greigite in den heutigen Plaggenauflagen geben Snowball & Thompson (1990), Santos-Carballal et al. (2016), Isambert et al. (2003) und Jelinowska et al. (1998) Denkansätze vor. Erstere stellen eine erhöhte Sensibilität des SD-Greigits für Oxidation fest. Letztere weisen experimentell eine Umwandlung frischer SD-Greigite zu partiell oxidierten PSD-Greigiten nach (Abb. 4.11: Kreise mit violetterm Kreuz stehen für frische Greigite -> schwarze Kreuze stehen für deren Oxidationsbildungen). Santos-Carballal et al. (2016) finden mittels eines Computermodells heraus, dass bei der, durch (Sicker-) Wasser geförderten, Greigit-Oxidation das S-Atom an der Oberfläche des Greigit-Moleküls durch ein O-Atom ersetzt wird. Als Folge, entsteht nach Isambert et al. (2003) eine dünne Schale aus amorphem Eisenoxid (Magnetit), welche die Greigit-Kristalle umschließt. Die Oxidation des Schwefeleisens trägt nebenbei auch zu einer pH-Erniedrigung in den Plaggenauflagen, im Vergleich zu den liegenden, natürlichen Bodenhorizonten (s. pH-Werte in Abb. 4.6 und 4.8), weil aus dem  $H_2O$   $H_2S$  entsteht und dissoziierte  $H^+$ -Ionen präsent sind (Schäfer et al. 2010; Dent 1986; Santos-Carballal et al. 2016). Es kann weiterhin folgernd gemutmaßt werden, dass im Rahmen des stetigen Wechsels von Durchlüftung und Sickerwasserumspülung der Aggregate in den Plaggenauflagen, diese langsam an Greigit verarmen und im Magnetitgehalt zunehmen (nach Jelinowska et al. (1998)). Sodass sich der gesamte Prozess in der Abnahme der Remanenz, der Koerzitivkraft und der Remanenzkoerzitivkraft der Proben niederschlägt. Deshalb weisen die dauerhaft durchlüfteten Plaggenauflagen-Greigite im Vergleich zu kurzzeitig und partiell oxidierten Greigiten von Jelinowska et al. (1998) auch niedrigere Hysterese- und Koerzitivkraft-Ratios auf (Abb. 4.11). Hierbei fällt außerdem auf, dass die PSD-Greigit-Bildungen vom Oberesch am weitesten von der modellierten SD-SP-Mischkurve von Roberts et al. (2011) liegen. Ein möglicher Hinweis darauf, dass sie sich bereits im weit fortgeschrittenen Stadium der Oxidation befinden, weil sie sich in einem feuchteren Milieu, als die Plaggenauflagen des Lechtinger Esch befinden? Jedenfalls ballen sich die 10 untersuchten Proben, trotz gewisser Streuung, in einem bestimmten Bereich des  $M_{RS}/M_S$ - $B_{CR}/B_C$ -Plots zusammen, was grundsätzlich als ein Zeichen für die Gültigkeit der aufgestellten Überlegungen gesehen werden kann.

Zusammengefasst steht also die Hypothese im Raum, dass in teils sehr stark sauren Plaggenauflagen des Lechtinger Esch ein anthropogen-induzierter, ursprünglich unter anoxischen Bedingungen auf dem Kompost, als SD-Greigit angereicherter, gegenwärtig jedoch im oxidativen Zerfall bzw. oxidativer Umwandlung begriffener Remanenzträger PSD-Greigit vorliegt. Diese hypothetische Abfolge gilt in erster Linie nur für den Lechtinger Esch.

Am Oberesch wird die oben geschilderte Genese des Greigits in den kompostierten Plaggen zunächst als Ausgangslage angenommen (siehe rAp/bE-Horizonte bzw. die Proben np10 und wp318). Die durchlässigen Böden werden im Schnitt 48 noch zusätzlich durch frei bewegliches und stauendes Wasser stark beeinflusst (Kap. 4.2.2). Unter der Annahme, dass die bE-Horizonte des Schnittes 48 tatsächlich aus kompostierten (s.  $P_i$ -Werte in Abb. 4.7 und 4.8) und ursprünglich mit Greigit angereicherten Plaggen bestanden, ist es nach Krüger et al. (2011) denkbar, dass es bei Stauwasserereignissen zur Lösung von Eisensulfiden sowie derer Oxidationsprodukte (Magnetit, s. o.) einerseits und wiederum bei oxidativen Verhältnissen nach Faßbinder (1994) zur Oxidation des ferrimagnetischen Greigits zu schwachmagnetischen Mineralen (Goethit) andererseits kommt. Die bei der ersten Möglichkeit entstehenden Lösungsprodukte werden fast vollständig vom Wasser profil- und hangabwärts abtransportiert, was sich in der sehr schwachen Suszeptibilität der bE-Horizonte im Schnitt 48 niederschlägt. Die zweite Möglichkeit von Faßbinder (1994) führt ebenso zu moderaten und niedrigen Suszeptibilitäten der Bodensubstrate. Der dabei im Bodensubstrat verbleibende, feinkörnige Goethit produziert letztlich die hohe Frequenzabhängigkeit der Suszeptibilität (Till et al. 2015). Demnach ist ebenfalls anzunehmen, dass auch die noch vor der Plaggengeschwirtschaft erworbenen remanenten Magnetisierungen (NRM) der archäologischen Befunde unter der Plaggenaufgabe am Oberesch das gleiche Schicksal ereilte und gegenwärtig ereilt.

Es sei jedoch auch hier noch ein weiteres Mal erwähnt, dass eine Überprüfung der Gültigkeit oben aufgeführter Überlegungen unbedingt weiterer, hochaufgelöster und multimethodischer Untersuchungen im Tiefenprofil bedarf! Bei einer erweiterten Probenzahl wären dabei zusätzliche Methoden, wie etwa Gitterkonstanten-Bestimmungen durch Röntgenanalysen gepaart mit elektronenmikroskopischen Untersuchungen empfehlenswert (Faßbinder & Bondar 2003; Roberts et al. 2011).

Die Hypothese der stauwasserbedingten Lösung, oxidativer Umwandlung sowie Abführung dominanter, magnetischer Eisenverbindungen in den von Gleyen-unterlagerten Plaggengeschichten. Damit einhergehendes Fehlen von ausgeprägten Volumenssuszeptibilitätskontrasten zwischen Verfüllungen und unbeeinflusster Bodenmatrix ist offensichtlich der Grund für das seltene Auftreten schwach-positiver, magnetischer Anomalien in den Magnetogrammen der archäologischen Stätte. Aus dieser Erkenntnis deutet sich an, dass aus Magnetometermessungen auf rein terrestrischen Plaggengesch-Standorten, wie etwa am Vergleichsstandort Lechtinger Esch, bessere Ergebnisse im Hinblick auf die Detektion archäologischer Strukturen mit remanenten Magnetisierungen zu erwarten sind.



Die Ergebnisse aus den beiden Plaggenesch-Standorten zeigen außerdem, dass heute in den, vom kompostierten Plaggeneschmaterial verfüllten, Gruben oder Gräben (z.B. in Eschgräben) Greigit in unterschiedlichen Oxidationsstadien bzw. Korngrößen bei terrestrischen Bedingungen als Magnetfeldanomalien-erzeugende Remanenzträger auftreten können. Bei weit fortgeschrittenen Oxidationsstadien kann Greigit seine magnetische Dominanz an Magnetit verlieren, so dass auch dieser als Magnetfeldanomalien-erzeugende Mineralphase mit möglicher subdominanter Greigitphase in o. g. Befunden denkbar wäre.

Vor weiteren, endgültigen Schlussfolgerungen sollen im Folgenden noch die Ergebnisse vom zweiten Hauptuntersuchungsgebiet, dem Karlsgraben, betrachtet und diskutiert werden.

#### 4.4 Magnetometerprospektionen am Karlsgraben

Während zweier Feldkampagnen wurden ca. 4 ha Fläche in den Bereichen des vermuteten Grabenverlaufs an der Scheitelhöhe des Karlsgrabens bzw. an der rezenten Wasserscheide magnetometrisch prospektiert (vgl. Abb. 3.9 und 4.12).

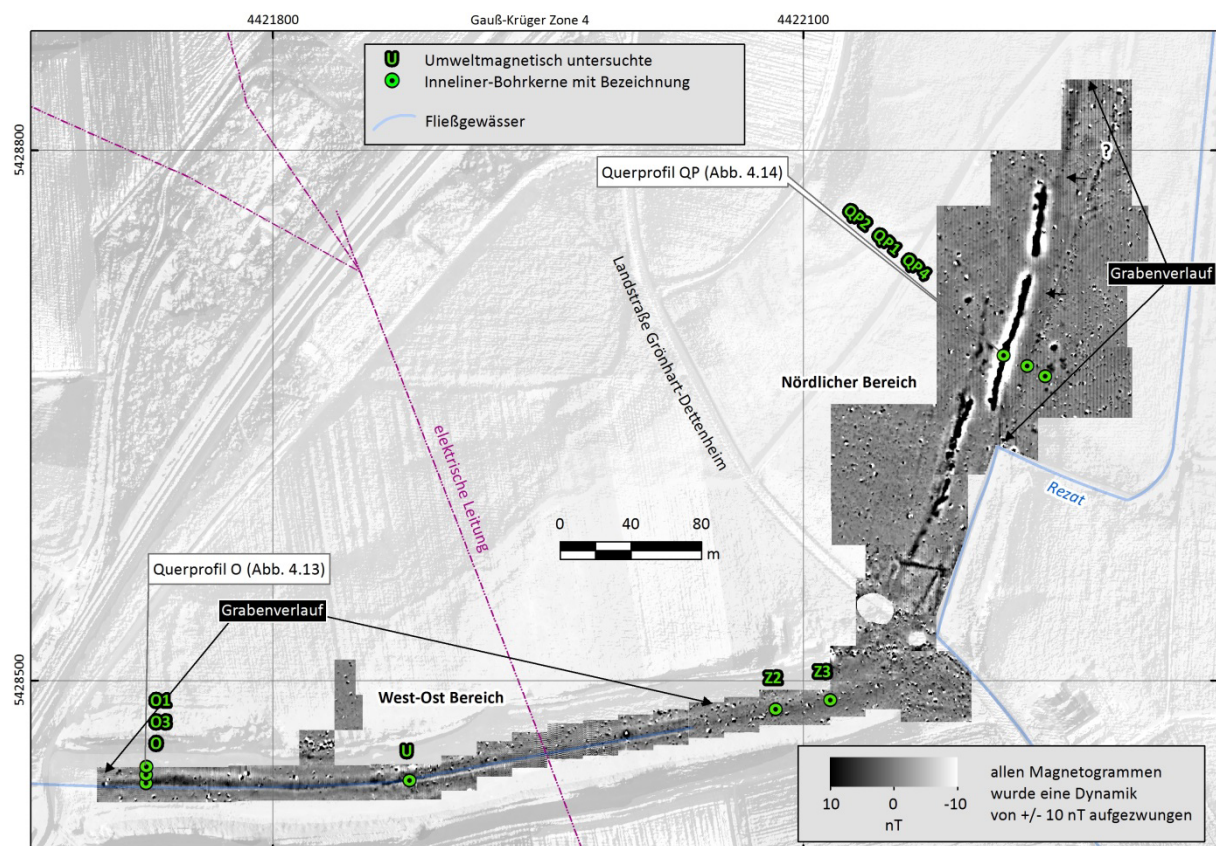


Abbildung 4.12: Ergebnisse der Magnetometerprospektion am Karlsgraben. Die Lage der eingezeichneten Bohrungen wurde anhand der Magnetogramme bestimmt und mit einem dGPS genau eingemessen. Umweltmagnetische Untersuchungen an diesen Bohrungen werden im weiteren Verlauf der Arbeit vorgestellt.

Aufgrund der schwierigen Topographie zwischen den Dämmen im West-Ost-Bereich wurden 20x20 m-Grids gelegt. Im nördlichen Bereich waren die Prospektionsbedingungen optimal, so dass hier 40x40 m-Grids gemessen werden konnten. Die Abbildung 4.12 stellt die Ergebnisse der Magnetometerprospektion in dem West-Ost und dem Nördlichen Bereich dar. Folgende Ausführungen fokussieren sich auf die Anomalien, die auf den ehemaligen Grabenverlauf bzw. den Paläokanal und seine Begleitstrukturen deuten, andere Anomalien werden vernachlässigt.

Bereits auf den ersten Blick sind die Magnetogramme vom Karlsgraben, im Hinblick auf die zu erwartenden archäologischen Strukturen (Paläokanäle bzw. Grabenverlauf), wesentlich ergiebiger als die Daten aus den Magnetometerprospektionen am Oberesch. Mehrere lineare Anomalien unterschiedlicher Intensität fallen in den Karlsgraben-Messbildern auf. Die 3 auffälligsten, intensivsten Anomalien (teils  $> 100$  nT und  $< -100$  nT) finden sich im nördlichen Bereich. Sie zeigen auf etwa 250 m Länge einen annähernden Nord-Süd-Verlauf und sind aufgetrennt bzw. segmentiert. Die südliche der 3 Anomalien zeigt dabei den längsten Verlauf und weist im Gegensatz zu den beiden nördlichen Anomalien unterschiedliche Intensitäten auf. Im Bereich nördlich der Landstraße zeigt sie geringere nT-Werte, als weiter im Norden. Außerdem verläuft sie ganz im Süden zunächst in einer Flucht mit den beiden nördlichen Anomalien, knickt aber nach etwa 25 m, abrupt in einem Winkel von etwa  $80^\circ$  nach Westen ab, bevor sie nach etwa 20 m wieder im selben Winkel nach Norden abknickt und ab da um etwa 10 bis 20 m nach Westen versetzt verläuft. In Bereichen hoher Intensität zeigen alle 3 Anomalien eine dipolare Nord-Südausrichtung, nach mündlicher Mitteilung von J. Faßbinder ist dies ein deutliches Zeichen für thermoremanente Magnetisierungen im Untergrund. Die Tiefenlage des Störkörpers wird aus den angewandten, magnetischen Potentialverfahren dabei auf ca. 1,5-2,5 m unter Geländeoberfläche geschätzt (Berg-Hobohm et al. 2014b: 27). Doch diese intensiven Anomalien stimmen nicht mit dem Grabenverlauf überein, denn der Paläokanal liegt etwa 15 m östlich zwischen zwei, im Gelände kaum sichtbaren, im LiDAR-DHM jedoch deutlich erkennbaren, Wällen (Zielhofer et al. 2014; Zielhofer & Leitholdt 2014; Abb. 3.9). In den Gradiometerdaten des Nördlichen Bereiches in Abbildung 4.12 fällt er als eine sehr schwache positive (max. 2 nT), die Magnetogramme vollständig querende und zu den intensiven Anomalien fast parallel-verlaufende, lineare Anomalie auf.

In den Magnetogrammen des West-Ost-Bereiches ist der Grabenverlauf zwischen den Wällen deutlich als eine schwach-positive ( $\sim 2$  nT), lineare Anomalie zu erkennen. Besonders gut ist die Anomalie im Westen des Ost-West-Bereiches ausgebildet, hier ist sie teilweise bis zu 5 m breit und wird von schwach-negativen ( $\sim -1$  nT), linearen Anomalien im Norden und Süden begleitet. Letztere zeigt räumliche Übereinstimmungen mit dem gegenwärtigen Verlauf eines Drainagegrabens. Die nördliche, schwach-negative Anomalie scheint zur der o. g. positiven, den Grabenverlauf-nachzeichnenden Anomalie zu gehören. Auffällig ist, dass die positive Anomalie im Bereich, wo die gesamte Grabenkonstruktion einen leichten Knick nach ONO vollzieht (im Bereich der Bohrung U in Abb. 4.12), in

ihrer Intensität zuerst zunimmt und danach wieder stark abnimmt um auf die Landstraße zulaufend schließlich fast gänzlich zu verschwinden.

Um der Interpretation der detektierten Anomalien eine tiefengeophysikalische Dimension zwecks Störkörperdetektion zu verleihen, wurden im Anschluss an die Magnetometerprospektion und an deren Ergebnissen orientiert, zahlreiche Innenliner Sedimentkerne für Volumenssuszeptibilitätsmessungen und weitere umweltmagnetische Analysen gewonnen (Abb. 4.12). Ausgewählte Ergebnisse dieser Messungen werden im folgenden Kapitel, kombiniert mit einer vereinfachten sedimentologischen Ansprache, betrachtet und im Hinblick auf die beschriebenen Magnetfeldanomalien diskutiert. Auf die Betrachtung der kompletten Sedimentationsgeschichte und des Bauplans des Karlsgrabens sei hier auf Leitholdt (2014), Zielhofer et al. (2014), Leitholdt et al. (2014) und Zielhofer & Leitholdt (2014) verwiesen.

## **4.5 Umweltmagnetische Untersuchungen am Karlsgraben**

### **4.5.1 VS der Sedimentkerne vom Karlsgraben**

In der Abbildung 4.13 ist die Verschneidung von Volumenssuszeptibilitätsmessungen an Innenliner-Sedimentkernen mit den sedimentologischen Bohrbefunden aus Zielhofer et al. (2014) für das Querprofil O dargestellt. Außerdem ist die Lage der Bohrungen innerhalb des betroffenen Magnetogramms eingezeichnet (rote Dreiecke im oberen Teil der Abb. 4.13).

Die Ergebnisse der Verschneidung zeigen anschaulich, wie tief und in welchen Sedimentlagen der Anomalie-erzeugende Störkörper zu verorten ist. Im Querprofil O ist es ein etwa 3,5 bis 4 m unter der Geländeoberfläche (GOF) liegende Teil der organischen Verfüllung des zentralen Grabenbereichs mit hohen  $\kappa$ -Werten von teils weit über 350 SI<sup>-6</sup> (s. Bohrung O in Abb. 4.13). Die aus sandigen Flussablagerungen und Kolluvien bestehende Sedimentmatrix, in die die organische Verfüllung des Paläokanals eingebettet ist (hier durch die Bohrung O1 repräsentiert), zeigt hingegen schwache und moderate Magnetisierbarkeiten, die nur selten die 200 SI<sup>-6</sup>-Grenze überschreiten. Ebenfalls durch moderate  $\kappa$ -Werte sind die Weiherablagerungen, die der organikreichen Kanalverfüllung hangen, geprägt.

Außerdem erschließt sich aus der Verschneidung sedimentärer Daten und Volumenssuszeptibilitätsmessungen, dass offensichtlich nicht die gesamte stark organische Kanalverfüllung durch höhere  $\kappa$ -Werte, im Vergleich zur Sedimentmatrix, geprägt ist (s. Bohrung O3 und O in Abb. 4.13 oberhalb sowie unterhalb des Störkörpers). Lediglich einzelne geringmächtige Lagen der organikreichen Substrate zeigen auffällige  $\kappa$ -Werte. Die zwischengeschalteten Weiherablagerungen in den stark organischen Kanalverfüllungen zeigen hingegen keine besonderen Auffälligkeiten in der Volumenssuszeptibilität.

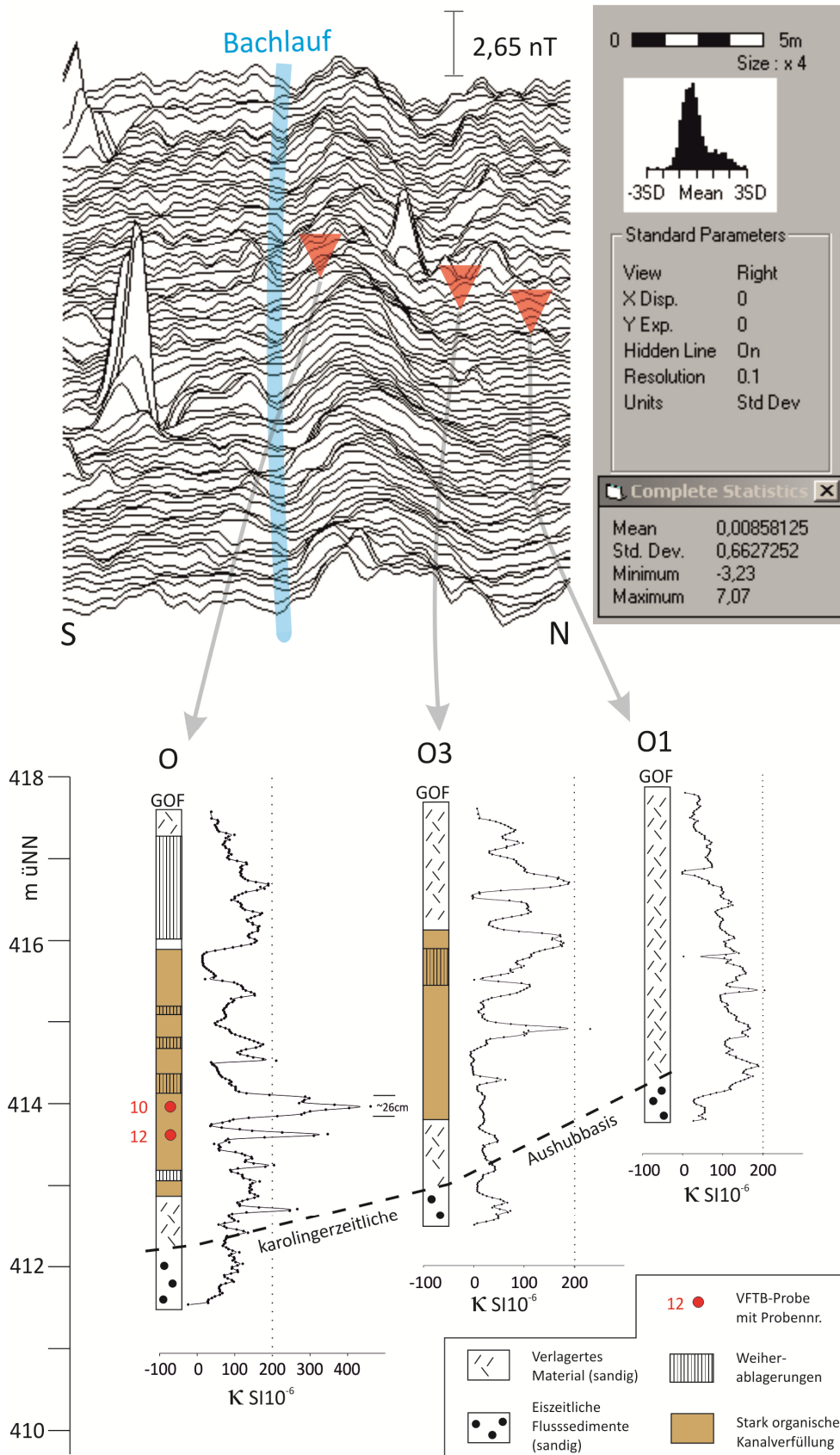
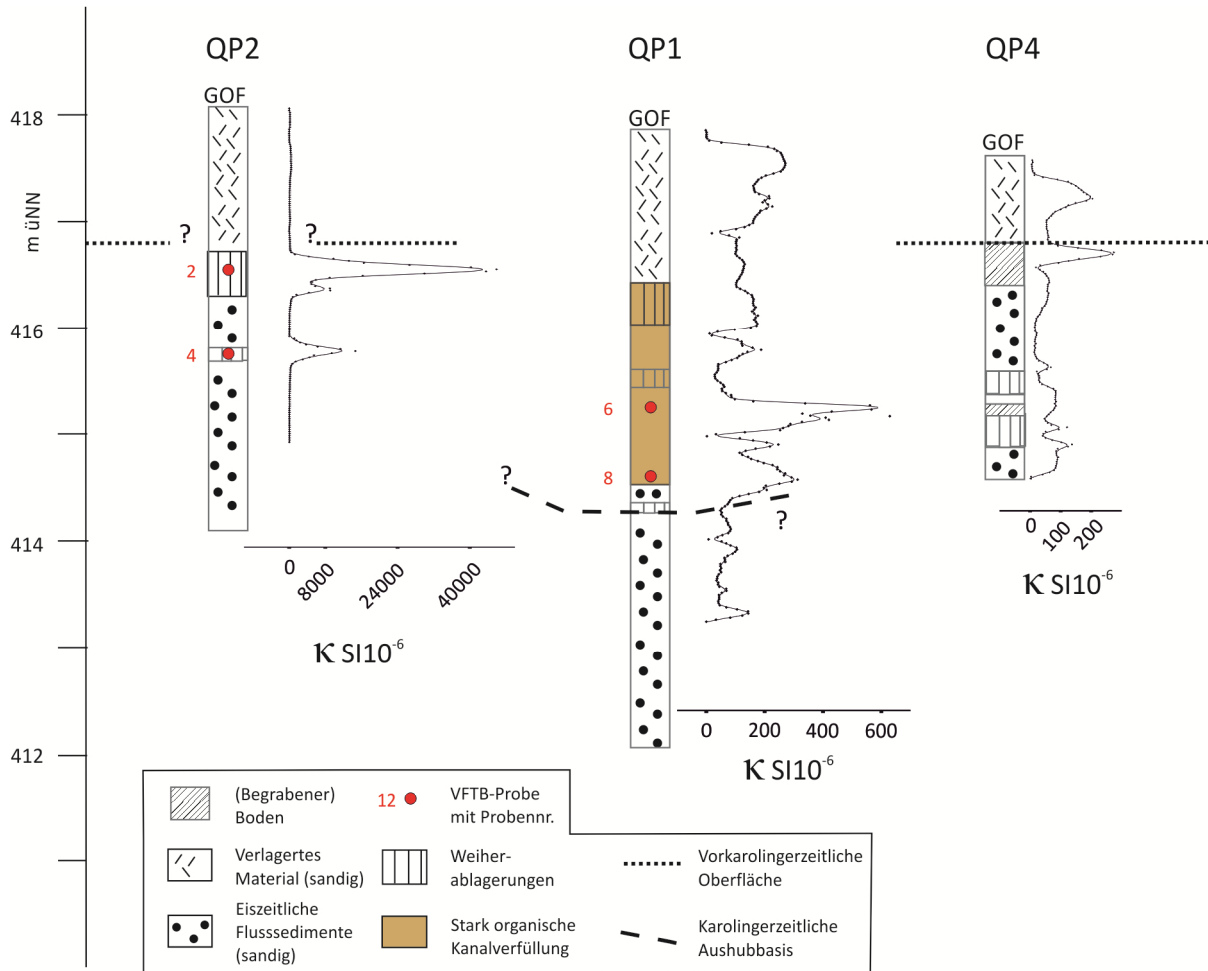


Abbildung 4.13: (Oben) Detaildarstellung des 20x20 m-Magnetogramms im Bereich des Querprofils O. Rote Dreiecke kennzeichnen die genaue Lage der Bohrungen. (Unten) Kombination der Sedimentsprache (aus Zielhofer et al. (2014); Benennungen nach Leitholdt et al. (2014)) mit Messungen der Volumenssuszeptibilität (Punkte=Messwerte, Kurve=Spline Interpolation der Messwerte nach Hammer (2015)).

Der durch die Bohrung O durchbohrte Störkörper weist also zwei, unterschiedlich mächtige Bereiche erhöhter Volumenssuszeptibilität auf. Die Lagen, welche die auffälligsten Kappapeaks zeigen und dadurch offensichtlich die Hauptverantwortung für die in den Magnetogrammen des West-Ost-Bereiches auftretende lineare Anomalie tragen, wurden für VFTB-Messungen beprobt (Abb. 4.13).



**Abbildung 4.14: Querprofil QP.** Dargestellt ist eine Kombination der Sedimentansprache (aus Zielhofer et al. (2014); Benennungen nach Zielhofer & Leitholdt (2014)) mit Messungen der Volumenssuszeptibilität (Punkte = Messwerte, Kurve = Spline Interpolation der Messwerte nach Hammer (2015)).

Nach ähnlichem Untersuchungsmuster wie im Querprofil O wird das Querprofil QP im Nördlichen Bereich der Fossa Carolina analysiert (Abb. 4.14). Für magnetometrisch eher unauffällige Flächen des Nördlichen Bereiches steht dabei die Bohrung QP4, die Bohrung QP1 durchdringt den zentralen Bereich des Paläokanals und die Bohrung QP2 kommt aus dem zentralen Bereich einer intensiven, auf Thermoremanenz-deutenden, linearen Anomalien (s. a. Abb. 4.12).

In der Bohrung QP4 (Abb. 4.14) zeigen nur die begrabenen Böden etwas erhöhte  $\kappa$ -Werte bis knapp über 200  $10^{-6}$  SI. Die Volumenssuszeptibilität der hangenden und liegenden Sedimente bewegt sich in schwachen (Liegendes) bis moderaten  $\kappa$ -Bereichen (hangendes Kolluvium). Im drastischen Gegensatz zu den Sedimenten der Bohrung QP4, deren Volumenssuszeptibilität weitestgehend die Werte der

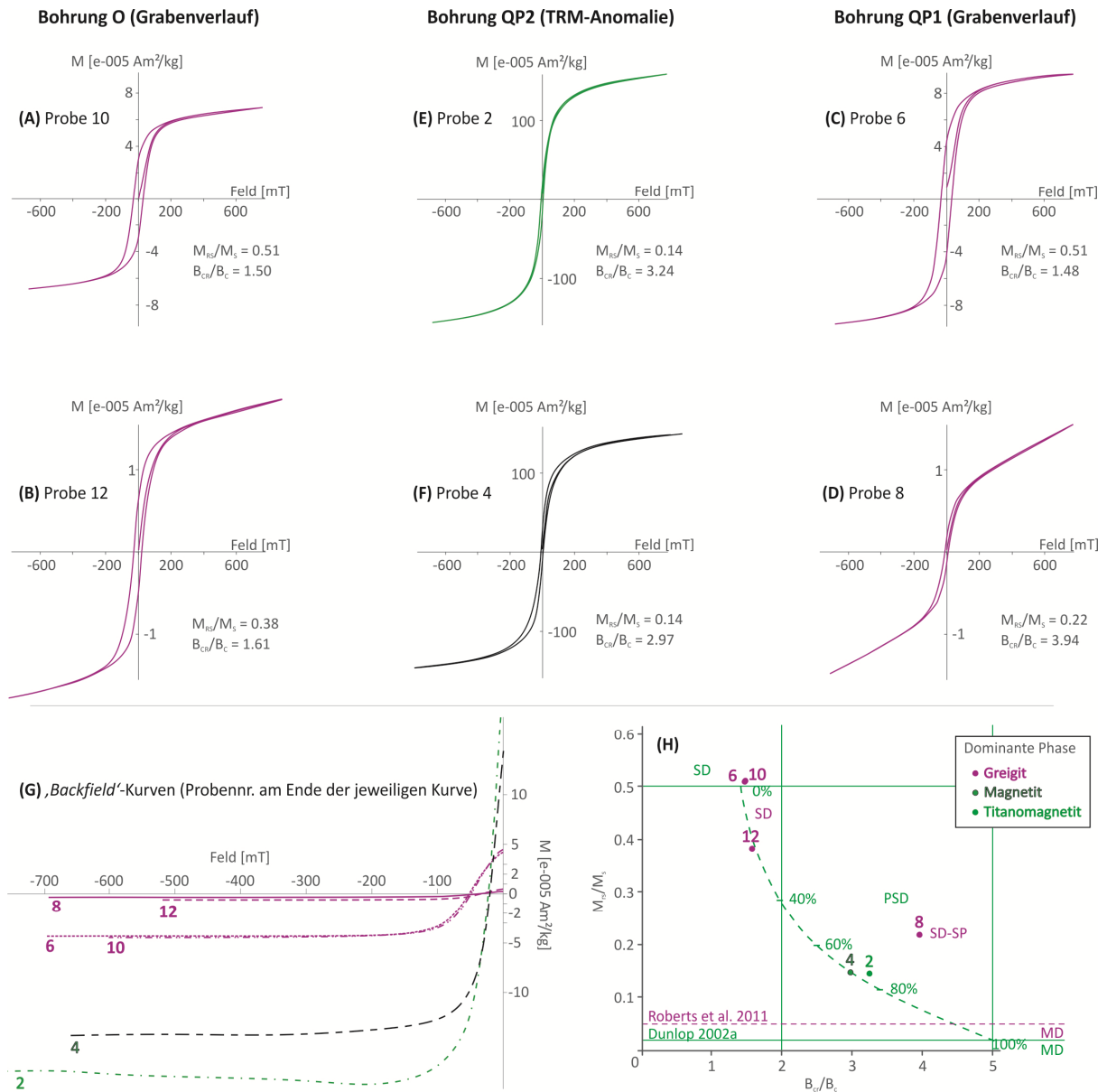
Sedimentmatrix im Nördlichen Bereich repräsentiert, stehen die von Zielhofer & Leithold (2014) zunächst als Weiherablagerungen angesprochene Schichten in der Bohrung QP2. Diese, für die Sedimente des betrachteten Bereiches offensichtlich fremdartigen Lagen (wird später weiter ausgeführt) zeigen einen Kappapeak, der bis an die Marke von 46.000 SI<sup>6</sup> heranreicht. Der Peak wird im Folgenden als ein Störkörper betrachtet, der für die intensiven, linearen Anomalien in den Magnetogrammen des Nördlichen Bereiches verantwortlich ist. Dieser Störkörper ist in der Tiefe von etwa 1,35 bis 1,55m unter GOF zu verorten und überlagert sowohl stratigraphisch als auch mit seiner Magnetisierbarkeit einen weiteren, etwa 2,30m unter GOF liegenden, Kappapeak mit  $\kappa$ -Werten von max. 15.000 SI<sup>6</sup>. Die sandigen Flusssedimente, in die die beiden Straten sehr hoher Volumenssuszeptibilität eingebettet sind, zeigen hingegen moderate  $\kappa$ -Werte. Ebenfalls durch moderate  $\kappa$ -Werte sind die sandigen Kolluvien im obeflächennahen Teil der Bohrung QP2 gekennzeichnet. Stellenweise wird diese über 1 m-mächtige, kolluviale Packung durch Einschaltungen hoher Volumenssuszeptibilität (max. 400 SI<sup>6</sup>, in Abb. 4.14 nur ansatzweise erkennbar) unterbrochen.

Der Grabenverlauf bzw. die Grabenverfüllung im Nördlichen Bereich und im Querprofil QP (Abb. 4.14) wird von der Bohrung QP1 repräsentiert. Wie im Querprofil O (Abb. 4.13) weisen auch hier einige Lagen in unteren Bereichen der stark organischen Kanalverfüllung markante  $\kappa$ -Peaks auf. Die sandigen Flusssedimente zeigen einen, für die Sedimentmatrix, typischen Wechsel von schwachen und moderaten  $\kappa$ -Werten. Ebenso schwache und moderate Volumenssuszeptibilitäten zeigen die oberen Bereiche der Kanalverfüllung mit Weiherablagerungen. Durch moderate und, zur Geländeoberfläche hin, etwas erhöhte Übernahmefähigkeiten sind die oberflächennahen Kolluvien im Profil QP1 gekennzeichnet.

Zur hinreichenden Klärung Anomalien-erzeugender Remanenzträger wurden auch im Querprofil QP die markantesten Kappapeaks der oben beschriebener Bohrungen für VFTB-Messungen sowie für die Ermittlung der Labor-Suszeptibilitätsparameter beprobt (rot gefüllte Kreise mit Probennr. in Abb. 4.14). Ergebnisse dieser Untersuchungen und erste Interpretationen werden im folgenden Abschnitt dargestellt.

#### **4.5.2 Umweltmagnetische Eigenschaften der Störkörper-Proben vom Karlsgraben**

Bereits eine erste, oberflächliche Betrachtung der Hysteresekurven sowie weiterer feldstärke- und feldrichtungsabhängiger Magnetisierungsparameter der Proben vom Karlsgraben in der Abbildung 4.15 und der Tabelle 4.2 offenbaren eine höhere Variabilität der Remanenzträger als in braunen Plaggeneschen des Oberesch und des Lechtinger Esch.



**Abbildung 4.15:** In der gesamten Abbildung sind in grüner, schwarzer und schwarzgrüner Farbe die magnetischen Eigenschaften der (Titano-) Magnetite und in violetter Farbe der Greigit dargestellt. In (A) bis (F) werden Hysteresekurven der Proben vom Karlsgraben gezeigt. Alle Hysteresen sind nicht reduziert. Jeweils links, unterhalb der Hysteresen, sind Domänenstruktur-Ratios abgetragen. In (G) werden ‚Backfield‘-Kurven aller Karlsgraben-Proben abgebildet. (H) zeigt einen Domänenstruktur-Plot (Day et al. 1977) der betrachteten Proben. Domänen und Mischkurven für Magnetit-Phasen sind dabei in grün eingetragen (aus Dunlop (2002a: 4-20, Figure 12) nach Day et al. (1977) und Parry (1982)). In violett sind Domänenstrukturen der Greigit dargestellt (nach Roberts et al. (2011)).

Der deutlichste Unterschied fällt beim genauen Blick auf die Form der Hysteresen (Abb. 4.15 (A) bis (F)) auf: alle Hysteresekurven zeigen nämlich positive para-/diamagnetische Gefälle, was das Vorhandensein paramagnetischer Minerale in allen Proben belegt. Nach einer Reduzierung der Hysteresen auf die Sättigung der ferrimagnetischen Komponenten (nach Leonhardt (2006), in Abb. 4.15 nicht dargestellt), einer Betrachtung der Koerzitivkraftparameter (Abb. 4.15; Tab. 4.2) und nach der Ermittlung

der Temperaturabhängigkeit der Magnetisierung (Abb. 4.16) lassen sich die Proben in 3 Gruppen einteilen. Gestützt von den Abbildungen 4.15 und 4.16 sowie von der Tabelle 4.2 werden die 3 Gruppen im Folgenden aufgelistet und beschrieben.

1. Gruppe bestehend aus den Proben 2 und 4, beide aus der Bohrung QP2 bzw. aus der intensiven, thermoremanenten und linearen Anomalie. Die Proben sind zwischen 200 und 250 mT (Abb. 4.15 (E) und (F)) vollständig gesättigt und zeigen sehr hohe Sättigungsmagnetisierungen ( $M_s$ ) bei hohen massenspezifischen Suszeptibilitäten ( $\chi$ ) (Tab. 4.2). Die Frequenzabhängigkeit der Suszeptibilität ( $\chi_{fd\%}$ ), ebenfalls in der Tabelle 4.2 zu finden, deutet auf eine Anreicherung superparamagnetischer Partikel in beiden Proben (Dearing et al. 1996).

**Tabelle 4.2: Übersicht über ausgewählte Suszeptibilitäts- und Magnetisierungsparameter, sowie über Domänenstruktur-Ratios, Curie-Temperaturen (Methode: 2. Ableitung) und dominante Remanenzträger von Karlsgraben-Proben. Die Einteilung in Gruppen (2. Zeile und Text) erfolgt nach Ausprägung des jeweiligen Parameters (hoch; mittel; niedrig) und nach Remanenzträgern.**

Probe	2	4	10	6	12	8
Gruppe (s. Text)	1	1	2	2	3	3
$\chi$ ( $10^{-6}\text{m}^3\text{kg}^{-1}$ )	47,4	38,2	0,3	0,2	0,1	0,2
$\chi_{fd\%}$	4,2	6,6	3,7	2,8	2,6	5,4
$M_s$ ( $\text{e-005 Am}^2/\text{kg}$ )	140	131	6,05	8,54	1,47	0,771
$M_{RS}$ ( $\text{e-005 Am}^2/\text{kg}$ )	20,1	18,7	3,07	4,34	0,555	0,167
$M_{RS}/M_s$	0,14	0,14	0,51	0,51	0,38	0,22
$B_C$ (mT)	6,76	6,43	31,45	34,48	23,85	11,48
$B_{CR}$ (mT)	21,9	19,13	47,13	50,89	38,44	45,24
$B_{CR}/B_C$	3,24	2,97	1,50	1,48	1,61	3,94
$T_{C\text{ final Heiz.}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	279	571	348	359	467	434
$T_{C\text{ final Kühl.}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	178	597	420	456	574	548
<b>Dominante magnetische (Ausgangs-) Phase</b>	PSD-Titanomagnetit	PSD-Magnetit	SD-Greigit	SD-Greigit	SD-Greigit	SD-SP Greigit

(weiter mit der 1. Gruppe) In einem  $\chi$ - $\chi_{fd\%}$ -Streudiagramm nach Dearing (1999: 48, nicht dargestellt) abgetragene Suszeptibilitätsparameter der Proben sprechen für die Anreicherung von SP-Partikeln als Folge einer Erhitzung. Die Hysteresen zeigen einen Magnetit-Typus (Abb. 4.15 (E) und (F)) (vgl. mit Fassbinder & Bondar (2013)), wobei Fabian's (2003) Gestaltparameter nur für die Probe 2 einen eindeutigen ‚*pot-bellie*‘ zeigt. Die Koerzitivfeldstärke ( $B_C$ ) und die Remanenzkoerzitivkraft ( $B_{CR}$ ) der Proben sind vergleichsweise gering (Abb. 4.15 (G); Tab. 4.2), was auf weichmagnetische Minerale und somit auf hohe magnetische Viskosität der Remanenzträger deutet. Anhand der Hysterese- und Koerzitivkraft-Ratios kann den beiden Magnetit-Typen im Day-Plot (Abb. 4.15 (H)) ‚*pseudosingle domain*‘-Status bescheinigt werden (Day et al. 1977), wobei nach Parry's (1982) Mischkurve die Mehr-



bereichsteilchen (MD) etwa 70% aller magnetischer Domänen darstellen. Thermomagnetische Messungen in der Abbildung 4.16 (Q) bis (X) und daraus errechnete Curie-Temperaturen in der Tabelle 4.2 offenbaren Unterschiede in der Magnetomineralogie der beiden Proben. Die Aufheizkurve der Probe 2 (Abb. 4.16 (R)) zeigt einen Anstieg der Magnetisierung zwischen 150 und 200°C. Dieser Bereich markiert einen Curie-Punkt, der charakteristisch für den stöchiometrischen Titanomagnetit ( $\text{Fe}_{2,4}\text{Ti}_{0,6}\text{O}_4$ ) mit einem Ulvöspinellgehalt von etwa 60% (TM60) ist (Soffel 2002; Akimoto 1962; Dunlop & Özdemir 1997). Nach dieser Titanomagnetit-Phase fällt die Aufheizkurve der Probe 2, ohne weitere, messbare Phasenübergänge, erst nach 600°C auf die Nullmagnetisierung. Die Aufheizkurve der Probe 4 (Abb. 4.16 (V)) beschreibt hingegen während des gesamten Aufheizzyklus einen konkaven Bogen, der etwa zwischen 560 und 630°C (s. 2. Ableitung der Aufheizkurve in Abb. 4.16 (W)) rasant auf die Nullmagnetisierung fällt. Aus der errechneten Curie-Temperatur des Aufheizzyklus (Tab. 4.2) geht Magnetit als Träger der Remanenz in der Probe 4 hervor (Dunlop & Özdemir 1997). Bemerkenswert sind 2 Auffälligkeiten in den M/T-Messungen: die Kühlkurven beider Proben verlaufen unter den Aufheizkurven (Abb. 4.16 (Q) und (U)) und die Kühl- und Aufheizkurven sind sich teils sehr ähnlich (Abb. 4.16: (S) ähnlich (T) und (W) sehr ähnlich (X)). Daraus kann gefolgert werden, dass es während der thermomagnetischen Messungen zu keiner (Probe 4) oder nur geringer (Probe 2) thermalinduzierter Veränderung der Ausgangsminerale kam und die Proben bereits vor M/T-Messungen schon mal auf über 700°C erhitzt wurden.

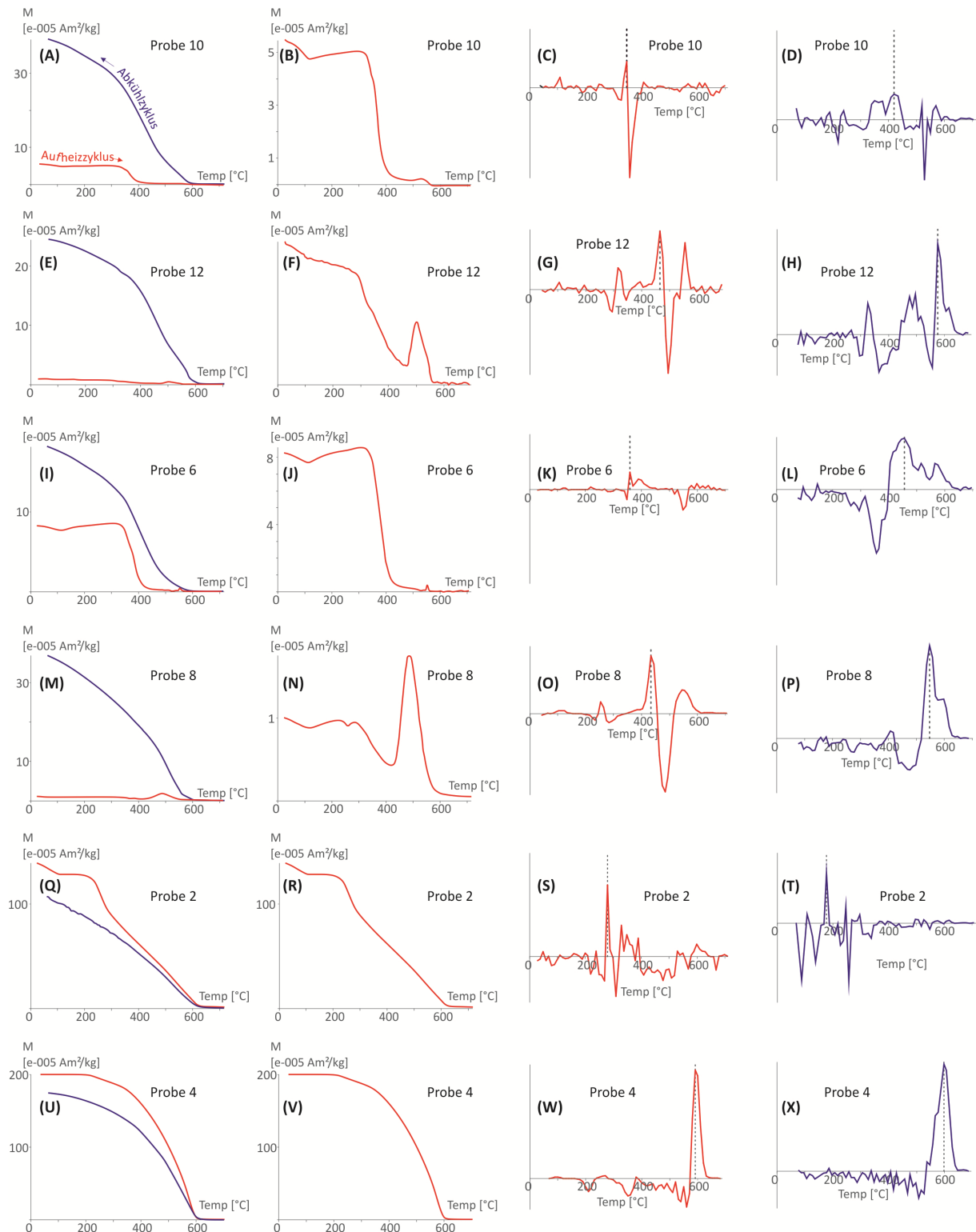
Die 2. Gruppe besteht aus den Proben 10 aus der Bohrung O und 6 aus der Bohrung QP1. Beide Proben kommen aus Lagen, die die Hauptverantwortung für das Auftreten des Grabenverlaufes in den Magnetogrammen des West-Ost-Bereiches und des Nördlichen Bereiches tragen (s. vorangegangenes Kapitel). Sie sind im Hinblick auf ihre magnetischen Eigenschaften sehr ähnlich und zeigen vergleichsweise niedrige, massenspezifische Suszeptibilitäten sowie messbare Anteile an Superparamagneten (s.  $\chi$  und  $\chi_{fd\%}$  in Tab. 4.2) (Dearing et al. 1996). Zwischen 230 und 280 mT erreichen sie ihre magnetische Sättigung (Abb. 4.15 (A) und (C)). Dabei weisen sie im Vergleich zur Gruppe 1 relativ niedrige Sättigungsmagnetisierungen auf. Demgegenüber stehen die viel höheren Koerzitivfeldstärken und Remanenzkoerzitivkräfte als in den Proben der 1. Gruppe (Tab. 4.2). Die Gestalt der Hysteresen beider Proben (Abb. 4.15 (A) und (C)) zeigt einen eindeutigen ‚*pot-bellie*‘ (Fabian 2003) und die Dominanz kleiner Einbereichsteilchen (SD), mit sich in Magnetisierungsrichtung auffächernden Spin-Strukturen (Liu et al. 2012; Tauxe et al. 1996). Im Day-Plot abgetragen, bestätigen die Hysterese- und ‚*Backfield*‘-Ratios den ‚*single domain*‘-Status der beiden Proben (Abb. 4.15 (H)). Die Aufheizkurven der Proben (Abb. 4.16 (B) und (J)) zeigen insgesamt 3 thermomagnetische Phasen. Die erste äußert sich in einem Knick in der M/T-Kurve und einer Erhöhung der Magnetisierung bei etwa 100°C, was in unmittelbarer Nähe des Curie-Punktes von Goethit liegt (Dunlop & Özdemir 1997). Diese Phase macht sich, auch durch die Färbung der Proben nach M/T-Messungen, in allen im Folgenden beschriebenen Proben bemerkbar und wird nicht mehr gesondert erwähnt. Auf die Goethit-Phase folgt ein stetiger Anstieg

der Magnetisierung, der bei etwa 350°C abrupt endet und die Curie-Temperatur der dominanten, ferrimagnetischen Phase Greigit in den Proben 10 und 6 markiert. Nach dem Abfall der Magnetisierung folgt noch ein kleiner Magnetisierungspeak bei etwa 580°C. Hier transformiert die Greigit-Phase partiell zu Magnetit. Die Ableitungen der Kühlkurven (Abb. 4.16 (D) und (L)) zeigen, dass neben den neu entstandenen Hämatit- (aus Goethit, s. Kap. 4.2.3) und Magnetit-Phasen auch partiell-oxidierte, teils immer noch magnetisch-dominante Anteile der Greigit-Phasen übriggeblieben sind (s. a. finale Curie-Temperaturen der Kühlkurven beider Proben in Tab. 4.2).

Die 3. Gruppe bilden die Proben 12 und 8. Diese Proben liegen stratigraphisch jeweils unter den beiden Proben aus der Gruppe 2 (s. Abb. 4.13 und 4.14) und sind somit ebenfalls in der Grabenverfüllung verortet. Sie sind in Bezug auf ihre Hysterese- und ‚Backfield‘-Eigenschaften weitgehend unterschiedlich (Tab. 4.2), zeigen aber untereinander ein ähnliches thermomagnetisches Verhalten (Abb. 4.16 (E) bis (H) und (M) bis (P)). Am besten sind die Ähnlichkeiten anhand der Ableitungen der Aufheiz- und Abkühlzyklen zu beobachten (vgl. in Abb. 4.16 (G) mit (O) und (H) mit (P)). Beide Aufheizzyklen und die daraus abgeleiteten Curie-Temperaturen (Tab. 4.2) zeigen, durch eine Erhöhung und abrupte Abnahme der Magnetisierung zwischen 300 und 400°C, Greigit als dominanten Remanenzträger, der während des Aufheizzyklus nahezu vollständig zu Magnetit transformiert (s.  $T_{C\text{ final Kühl}}$  in Tab.4.2 und Abb. 4.16 (H) und (P)). Die Ausgangs-Greigite in den Proben 12 und 8 weisen unterschiedliche Korngrößen auf und liegen deshalb im Day-Plot weit auseinander (Abb. 4.15 (H)). Probe 8 ist dabei bereits bei 250 mT gesättigt (Abb. 4.15 (D)), anders als die Probe 12, die ihre Sättigung erst nach 300 mT erreicht und hohe ‚Backfield‘-Parameter aufweist (Abb. 4.15 (B) und Tab. 4.2). Sie liegt somit in der Nähe der modellierten SD-SP-Mischung von Roberts et al. (2011) (Abb. 4.17), wobei SP-Anteile in dieser Probe eher gering ausfallen, weil sie gerade noch im messbaren Bereich liegen (Tab. 4.2). Die Probe 8 weist hingegen sehr außergewöhnliche Hysterese- und Koerzitivkraft-Ratios auf, die aufgrund der niedrigen Sättigungsmagnetisierung und -remanenz ein den Plaggenesch-Greigiten ähnliches  $M_{RS}/M_S$ -Ratio zeigen. Weiterhin ist die Koerzitivfeldstärke der Probe 8, aufgrund der frühen Sättigung, zwar relativ gering, die Remanenzkoerzitivkraft ist hingegen hoch, was sich in einem sehr hohen  $B_{CR}/B_C$ -Ratio widerspiegelt (Tab. 4.2; Abb. 4.15 (H); Abb. 4.17).

Die gemessenen magnetischen Verbindungen am Karlsgraben unterscheiden sich also wesentlich voneinander. Dabei erzeugen die ferrimagnetischen Eisenoxide (Gruppe 1) andere Anomalien in den Magnetogrammen als die ferrimagnetischen Eisensulfide (Gruppen 3 und 4). Außerdem deuten die für die Anomalien verantwortlichen Remanenzträger der Störkörper nicht nur verschiedenartige NRM's an, sondern auch unterschiedliche Entstehungsprozesse und Herkunft magnetischer Partikel. Diese beiden Thematiken sollen im folgenden Kapitel aufgegriffen und diskutiert werden.

## 4 Ergebnisse und Diskussion



**Abbildung 4.16:** Thermomagnetische Kurven der Proben vom Karlsgraben (jeweils eine Probe pro Zeile). In der ersten Spalte sind Aufheiz- und Abkühlkurven zusammen dargestellt. Die 2. Spalte zeigt nur die Aufheizkurve. In der 3. Spalte ist die 2. Ableitung der Aufheizkurve mit der automatisch errechneten Curie-Temperatur (gestrichelte Linien) der dominanten, magnetischen Festphase dargestellt. Die 4. Spalte zeigt die 2. Ableitung der Abkühlkurve mit den automatisch kalkulierten Curie-Temperaturen des Abkühlzyklus (s. a. Tab. 4.2).

## 4.6 Entstehung von Magnetfeldanomalien am Karlsgraben

### 4.6.1 Herkunft ferrimagnetischer Eisenoxid-Störkörper

Ergebnisse der Leitgröße Volumenssuszeptibilität haben ergeben, dass die bis zu  $\pm 200$  nT-intensive (Berg-Hobohm et al. 2014b), lineare Magnetfeldanomalie im Nördlichen Bereich von einer etwa 40 cm mächtigen, aus feinkörnigen, schwarzen und roten Schichten bestehenden Lage (Leitholdt 2014) erzeugt wird. Die höchsten  $\kappa$ -Werte innerhalb dieser Lage zeigt eine dunkel-rot-braune (2,5YR 3/4) Schicht in der Tiefe von 1,5 m unter Geländeoberfläche. Die Suszeptibilitäts- und VFTB-Messungen der Schicht zeigen, dass das Substrat hohe Volumenanteile des ferrimagnetischen Eisenoxids Titanomagnetit (TM60) enthält. Thermomagnetische Messungen, in der Abbildung 4.16 (Q) bis (X) dargestellt, beweisen eine Erhitzung beider, betrachteter Schichten sehr hoher VS in der Bohrung QP2 auf über 700°C und somit eine offenbar allochtone Genese, nicht nur des Störkörpers der intensiven Magnetfeldanomalie (repräsentiert durch die Probe 2), sondern auch der Schicht, aus der die Probe 4 stammte.

Eine natürliche, authigene Bildung von gesteinsmagnetisch nachgewiesenem TM60 und seine in-situ-Erwerbung der Thermoremanenz im Nördlichen Bereich des Karlsgrabens wird aus folgenden Gründen ausgeschlossen:

- primär kristallisieren sich solch hochehitzte Eisenverbindungen im Zusammenhang mit vorangegangener vulkanischer Aktivität aus (nach Schmincke (2010)). So können sie in frischen Eruptionsmassen (Carey & Sigurdsson 1985) oder in phänokristallinen Tephra Lagen (Wörner & Schmincke 1984), aber nicht als Primärkristall in einer feuchten Aue, ohne Vulkanismus, vorkommen.
- Sekundär kann der Titanomagnetit in vorliegender Form als Verwitterungsprodukt in Böden auf Basaltgesteinen entstehen (Fassbinder & Bondar 2013). Im Einzugsgebiet der Rezat stehen jedoch keine Basalte an (nach Schmidt-Kaler (1976)). Ein detritischer Eintrag von TRM-Titanomagnetiten wird deshalb ebenfalls ausgeschlossen.

So muss es sich bei vorliegenden magnetischen Eisenoxiden von vornherein um Fremdkörper handeln, die ohne den Faktor Mensch im betrachteten Bereich der Rezataue nicht vorkommen dürften.

In der näheren geologischen Umgebung des nördlichen Bereiches des Karlsgrabens kämen als natürliche Herkunftsgebiete für derart hochehitzte (Titano-) Magnetite nur die Auswurfmassen des Ries-Impaktes in Frage, die in der GK 25 als Bunte Breccien südlich von Grönhart und nord-westlich von Graben auskartiert sind (Schmidt-Kaler 1976; Abb. 3.9). In Bedingungen, in denen diese Auswurfmassen entstanden, haben sehr hohe Temperaturen geherrscht (Engelhardt 1997). Dabei kam es im Rahmen des hyperthermalen Meteoriteneinschlags zur Entstehung, Auswurf und Ablagerung des äußeren Suevits bzw. des Suevits außerhalb des Kraterrandes, der heute laut Meyer (2013) die Bunte Breckzie

überdeckt. Pohl (1974) schreibt diesen stark erhitzten Suevit-Schichten teils hohe Suszeptibilitäten und remanente Magnetisierungen zu, ohne jedoch explizit auf mögliche Remanenzträger einzugehen. Wenn es also nun tatsächlich bei den untersuchten Lagen um den Riessuevit handeln sollte – was noch zu klären gilt –, müsste jemand das Material in Bunten Breccien abgebaut und in die nördlichen Bereiche des Kanals verfrachtet haben. In solch einem Fall wäre der Störkörper der intensiven Magnetfeldanomalie zwar nicht anthropogen erhitzt, jedoch zumindest vom Menschen bewegt und abgelagert worden.

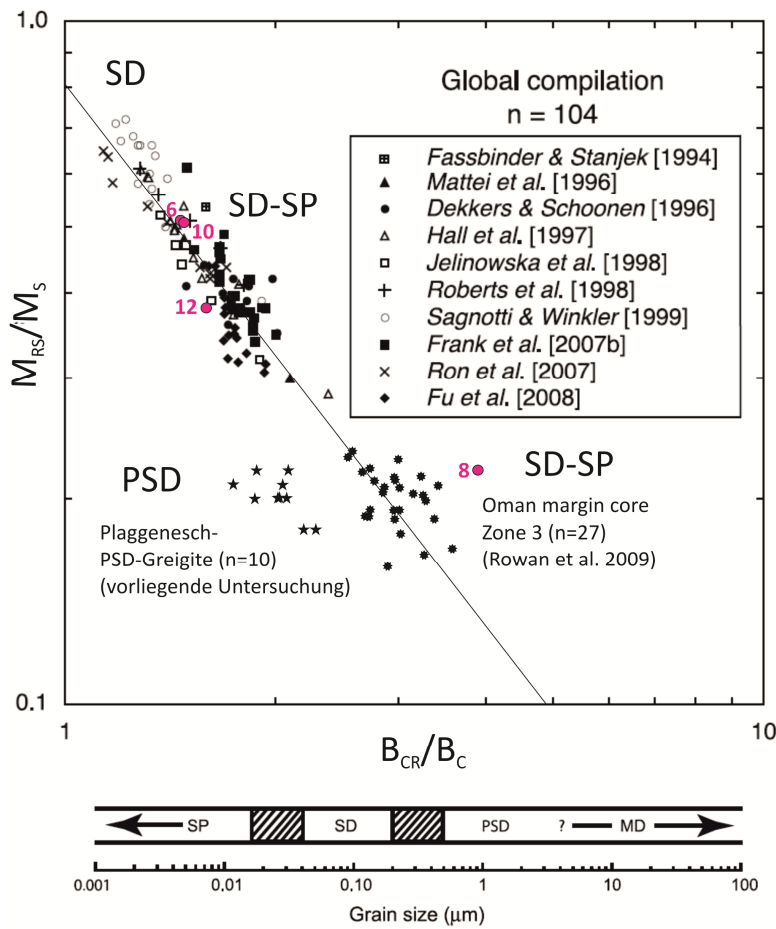
Von Berg-Hobohm et al. (2014a) wurde die These von gebrannten Ziegeln als Erzeuger der intensiven Anomalien zur Diskussion gestellt. Der Habitus und besonders die Farbe des Materials aus betrachteten Schichten, erinnern tatsächlich an stark aufgeweichte Ziegelreste, speziell an rote Dachziegelreste. Und auch aus der Literatur ist bekannt, dass Titanomagnetite in hochoerhitzten Ziegeln und Tonscherben als Remanenzträger auftreten können. Zum Beispiel dokumentieren Casas et al. (2005) in Backsteinen Titanomagnetite, Dunlop (2000b) stellt seinerseits nach Cui & Verosub (1995), Yu et al. (2000) und Carvalho (2000) einen großen Datensatz für (Titano-) Magnetite aus Tonscherben vor. Die Schlussfolgerung von Zielhofer et al. (2014) und Leitholdt (2014), dass die Anomalie-erzeugende TM60-Lage stratigraphisch im Zusammenhang mit dem Kanalbau zu stehen scheint und die Tatsache, dass intensive Magnetfeldanomalien aus SQUID-Gradiometerdaten (Linzen & Schneider 2014), die auf gleiche oder ähnliche Remanenzträger schließen lassen, fast den gesamten Kanalverlauf in nördlicher Richtung flankieren, bekräftigt die Interpretation der Lagen als anthropogen-eingebrachtes Substrat. Eine robuste Beweisführung und zweifelsfreie Feststellung der These von Ziegeln als Anomalien-Erzeuger, liefert jedoch keine der vorliegenden Erkenntnisse, auch nicht der Befund von hochoerhitzten Titanomagnetiten und Magnetiten im Bohrgut der Bohrung QP2. Zusätzliche Information über die genaue Beschaffenheit des Störkörpers im Planum und Bodenprofil sind unbedingt notwendig. Solche Informationen wird letztendlich nur eine archäologische Ausgrabung des magnetometrisch-umweltmagnetischen Befundes liefern können.

Im Hinblick auf das Ziel der vorliegenden Arbeit lassen sich mit dem aus umweltmagnetischen Daten gewonnenen Wissen nun die intensiven Anomalien in Magnetogrammen des Nördlichen Bereiches des Karlsgrabens weiterführender interpretieren. Für das dipolare Auftreten der Anomalien ist nämlich die hohe Viskosität der magnetisch-weichen Titanomagnetite verantwortlich. Sie bedingt, dass sich die Remanenzträger im, durch Grundwasser, aufgeweichten Sediment in den Vektor des Erdmagnetfeldes drehen und sich somit als intensive, längsgezogene Dipolanomalien in den Magnetogrammen niederschlagen (mdl. Mitt. J. Faßbinder (2014)). Vor diesem Hintergrund wirft die Veränderung der längsten, sich nördlich der Landstraße 2 Mal abknickenden, Anomalie von einer rein positiven zu einer intensiv-dipolaren Anomalie im Norden (Abb. 4.12) eine Frage auf: schlagen sich die Titanomagnetite nur im wasseraufgeweichtem Sediment als intensive Dipolanomalien in Magnetogrammen nieder? Diese Frage könnte durch die in vorliegender Arbeit vorgestellte, methodische Herangehens-

weise, die in der Abbildung 5.1 schemenhaft dargestellt ist, beantwortet werden. Hierzu müsste die Magnetfeld-anomalie in weniger intensiven Bereichen angebohrt und umweltmagnetisch untersucht werden. Eine Beantwortung der Frage würde dabei nicht nur weitere Verbesserungen der Interpretation von Magnetogrammen am Karlsgraben in Aussicht stellen. Auch ein besseres Verständnis der rezent-hydrologischen und womöglich – in Kombination mit sedimentologischen Analysen – auch der paläohydrologischen Situation, hier an der Scheitelhöhe des Kanalbauwerks, wären denkbare Perspektiven. Einen unmittelbaren Zusammenhang mit rezenten Grundwasserverhältnissen am Karlsgraben zeigen nämlich die Remanenzträger, die für das Auftreten des Kanalverlaufs in den Magnetogrammen des West-Ost- und Nördlichen Bereiches verantwortlich gemacht werden: die ferrimagnetischen Greigite. Deren Entstehung und Bedeutung als Störkörper wird im nächsten Kapitel diskutiert.

#### 4.6.2 Entstehung ferrimagnetischer Eisensulfid-Störkörper

Die Abbildung 4.17 zeigt, dass alle in den betrachteten  $\kappa$ -Peaks (s. Abb. 4.13 Bohrung O und Abb. 4.14 Bohrung QP1) gesteinsmagnetisch-detektierten und Anomalien-erzeugenden Greigite einer Gruppe von natürlichen Eisensulfid-Bildungen angehören, die aus einer Mischung von SD- mit SP-Partikeln bestehen (Roberts et al. 2011). Auffällig ist dabei die Probe 8, die relativ weit rechts von der SD-SP-Mischkurve liegt und relativ hohe SP-Anteile (s. a. Tab. 4.2) aufweist. Ihr hohes  $B_{CR}/B_C$ -Ratio bedingt, dass sie sich bei ähnlichem  $M_{RS}/M_S$ -Ratio, wie die Plaggenesch-Greigite, auf der gegenüber liegenden Seite der SD-SP-Mischkurve befindet. Diese Lage wird auf einen Entstehungsprozess zurückgeführt, der offensichtlich einer Oxidation gegenteilig ist, nämlich auf eine reduktive Greigit-Anreicherung (nach Jelinowska et al. 1998). Denn solchen Anreicherungsprozessen wurden Greigite aus marinen Sedimenten von Rowan et al. (2009) (s. *Oman margin core Zone 3* in Abb. 4.17) unterworfen, die im  $M_{RS}/M_S$ -gegen- $B_{CR}/B_C$ -Plot der Probe 8 nahe liegen. Rowan et al. (2009) postulieren für ähnliche Eisensulfid-Bildungen ein authigenes Wachstum als Folge einer SP-Anreicherung im Rahmen der reduktiven Diagenese. Bei diesem Wachstum werden Lücken zwischen alten, authigenen SD-Greigit-Generationen mit wachsenden neuen SP-Greigit-Aggregaten gefüllt. Ähnliche Prozesse werden auch für die Probe 8 angenommen. Aber diese Annahme ist zunächst als Hypothese zu betrachten, die noch weiterer multimethodischer Untersuchungen und größerer Fallzahl bedarf, denn solche Greigit-Bildungen und reduktive SP-Anreicherungen wurden bisher nur in marinen Sedimenten beobachtet (Rowan et al. 2009; Rowan & Roberts 2006).



**Abbildung 4.17:** Ein aus Hysterese- und ‚Backfield‘-Ratios erstellter Day-Plot (oben) (nach Day et al. (1977) aus Roberts et al. (2011: 11 (c), modifiziert)) gibt Auskunft über den Domänenstatus von Greigiten verschiedener Autoren aus einer globalen Zusammenstellung. Karlsruhe-Graben-Greigite sind als violett eingefärbte Kreise eingezeichnet. Zum Vergleich sind außerdem die Plaggenesch-PSD-Greigite (Sterne) und SP-angereicherte Greigite aus Rowan et al. (2009) (als komplexe Sterne) abgetragen. Unten sind derzeit beste Korngößenabschätzungen für magnetisches Domänenverhalten der Greigite dargestellt (Roberts et al. 2011: 8 (g)). Weitere Informationen zur Abbildung befinden sich im Text.

Für die anderen Anomalien-erzeugenden Eisensulfid-Remanenzträger am Karlsgraben zeigt der  $M_{RS}/M_S$ -gegen- $B_{CR}/B_C$ -Plot in der Abbildung 4.17, dass die Proben 6 und 10 in ihrem Domänenstatus den SD-Greigiten von Hall et al. (1997), Roberts et al. (1998) sowie auch Fassbinder & Stanjek (1994) ähneln. Die Probe 12 weist ihrerseits Ähnlichkeiten mit dem Domänenstatus des ferrimagnetischen Schwefeleisens von Jelinowska et al. (1998). So stützen sich folgende Interpretationen – falls nicht anders zitiert – auf die Erkenntnisse dieser Autoren.

Bei allen Lagen, aus denen die Proben 6, 10, 12 und auch die Probe 8 stammen, handelt es sich um Substrate, die eine postsedimentäre Remagnetisierung erfahren haben. Dabei folgte das Phänomen der Remagnetisierung den ursprünglichen Konditionen der substratabhängigen Magnetostratigraphie nicht. Dennoch boten die vorliegenden Substrate notwendige Ausgangsbedingungen für eine Anreicherung Magnetfeldanomalien-erzeugender, sulfidischer Remanenzträger. Als sekundäre, authigene Bildungen sind diese SD-Greigite im organikreichen, anoxischen Milieu erst nach dem Aufwachsen der stark organischen Grabenverfüllungen entstanden. Vor Ort, haben sie auch ihre Remanenz erworben, die nach Snowball (1997) der stabilen, chemischen Remanenz (CRM, s. Kap 2.2.4) zuzuordnen ist. Dabei ist die Anreicherung der SD-Greigite in den Grabenverfüllungen sehr wahrscheinlich auf eine Biomineralisierung des feinkörnigen Schwefeleisens durch magnetotaktischen Bakterien zurück zu führen. Vermutlich handelt es sich um ähnliche Organismen, die von Stanjek et al. (1994) für die

Greigitbildung in Gley-Böden verantwortlich gemacht werden. Dieser Vermutung wird eine präferierende Gültigkeit eingeräumt, weil es sich in Karlsgraben-Sedimenten um ähnliche Bildungsbedingungen, wie in Gley-Böden von Stanjek et. al. (1994) handelt: organikreiches Substrat, Süßwassermilieu, reduktive Verhältnisse und relativ oberflächennah. Ähnliche SD-Greigite o. g. und anderer Autoren sind hingegen in völlig anderen Umweltbedingungen und Tiefenlagen entstanden. Die Vermutung einer biogenen Entstehung bzw. der biogene Habitus der SD-Greigite sollte dennoch durch eine Elektronenmikroskop-Aufnahme abgesichert werden.

Interessanterweise erfasst der eingesetzte Vektor-Gradiometer, trotz des kurzen Gradienten (Faßbinder 2008) und der eigentlich als schwach geltenden CRM der remagnetisierten Schichten, die Eisensulfid-Störkörper im Paläokanal in bis zu 3,5 m Tiefe! Ist dies den außergewöhnlichen magnetischen Eigenschaften der SD-Greigite geschuldet oder ein Feldeffekt, der auf die Grundwassersättigung der Sedimente zurück zu führen ist? Diese Fragen können in vorliegender Untersuchung nicht beantwortet werden. Hierfür sind zusätzliche Messverfahren und experimentelle Anordnungen notwendig. Die noch nicht gänzlich ausgewerteten Kappmessungen an Innenliner-Bohrungen aus dem West-Ost-Bereich deuten jedoch an, dass nach 4 m Tiefe die maximale Tiefenerfassung des Grad 601 überschritten zu sein scheint (Abb. 4.18). Denn das Einhängen der  $\kappa$ -Messungen in ein Längsprofil nach Leitholdt et al. (2014) und Zielhofer & Leitholdt (2014) zeigt, dass der in 5 m Tiefe-liegende  $\kappa$ -Peak der Bohrung Z2 vom Magnetometer kaum noch erfasst wird (vgl. Abb. 4.18 mit Abb. 4.12). Die mächtigere Sedimentüberdeckung über den Schichten hoher Volumenssuszeptibilität im Osten des West-Ost-Bereiches ist also offensichtlich der erste Grund für das allmähliche Abklingen der linearen Anomalie in Richtung der Landstraße (Kap. 4.4 und Abb. 4.12) bzw. in Richtung der Scheitelhöhe des Kanalbauwerks. Ein weiterer Grund ist offenbar eine generelle Abnahme von Schichten hoher  $\kappa$ -Suszeptibilität im östlichen West-Ost-Bereich. Das Bohrgut der Bohrung Z3 (Abb. 4.18) zeigt nämlich so gut wie keine Lagen mit auffälligen magnetischen Eigenschaften. Dies kann auf eine geringe authigene Greigit-Anreicherung oder sogar auf ein vollständiges Ausbleiben sekundärer Eisensulfid-Biomineralisierung zurückgeführt werden. Der Grund liegt vermutlich in wesentlich niedrigeren Organik-Gehalten in der Bohrung Z3 (<15%) im Vergleich zu den Bohrungen O, U und Z2 (nach Leitholdt (2014)). Des Weiteren ist auch denkbar, dass hier, in der Nähe der rezenten Wasserscheide keine durchgehend sauerstofffreien Verhältnisse herrschen, was ebenfalls dazu führt, dass eine SD-Greigit-Anreicherung gehemmt bzw. ganz unterbunden wird.





Die Abbildung 4.18 offenbart aber noch mehr, als nur die o. g. Gründe für das Abklingen der linearen, den Grabenverlauf-nachzeichnenden, Greigit-Anomalie gen Osten. Sie zeigt außerdem, dass der, durch die NRM des SD-Greigits hervorgerufene  $\kappa$ -Peak (VFTB-Probe 10) auf demselben Niveau, wie die  $\kappa$ -Peaks in stark organischen Grabenverfüllungen der Bohrungen U und Z2 liegt. Diese Auffälligkeit kann als die bereits sauerstofffreie Unterkante einer oxisch/anoxischen Übergangszone nach Hesse & Stolz (1999) und Konhauser (2007) interpretiert werden.

Wie oben und im Kapitel 4.3 bereits erläutert, kommt es gerade in solchen oxisch/anoxischen Übergangszonen, bei ausreichendem Vorhandensein an organischer Substanz (nach Leitholdt (2014) offenbar >15%) und reduktiven Verhältnissen zu sekundären Greigit-Anreicherungen und damit einhergehenden Remagnetisierungen der Substrate. Da in den hangenden, organogenen Schichten keine derartig ausgeprägten  $\kappa$ -Peaks anzutreffen sind, werden die Tiefenniveaus der Proben 10 und 6 als rezente Unterkanten der oxisch/anoxischen Übergangszone interpretiert (blaue Linien in Abb. 4.18).

Die unter der oxisch/anoxischen Übergangszone-liegenden, ebenfalls mit Greigit-Bildungen (Probe 12 und 8) angereicherte,  $\kappa$ -Peaks markieren anscheinend ehemalige Unterkanten der oxisch/anoxischen Übergangszonen, wo teilweise rezente SP-Anreicherung im Rahmen der reduktiven Diagenese (Probe 8) stattfindet (nach Rowan et al. (2009)). Zusätzliche, tieferliegende  $\kappa$ -Peaks befinden sich unterhalb der stark organischen Kanalverfüllung (s. ? in der Bohrung O) und teils sogar unter der karolingerzeitlichen Aushubbasis (s. ? in der Bohrung U). Welche Remanenzträger diese  $\kappa$ -Peaks erzeugen und auf welche syn- oder postsedimentäre Bildungsprozesse diese umweltmagnetischen Signale beruhen, muss durch eine gesonderte Untersuchung geklärt werden. Bereits aus vorliegenden Ergebnissen und Erkenntnissen deutet sich jedoch an, dass die Bildung ferrimagnetischer Eisensulfide und ihr Domänenstatus (s. Probe 8) offensichtlich eng mit den Grundwasserverhältnissen in der Verfüllung des Kanalbauwerks zusammenhängt. So kann die Abbildung 4.18 im vorliegenden Kapitel, neben ihrer Funktion als Ergebnisdarstellung, schlussendlich auch als eine Art Darstellung der Potentiale einer Verschneidung umweltmagnetischer, sedimentologischer, geoarchäologischer und hydrologischer Untersuchungen am Karlsgraben, in anderen verlandeten Paläokanälen und auch allgemein in organikreichen, semiterrestrischen, holozänen Geo- bzw. Umweltarchiven betrachtet werden.

## 5 Schlussfolgerungen und Perspektiven

### 5.1 Schlussfolgerungen und Beantwortung der Fragestellungen

Im ersten Kapitel der vorliegenden Arbeit wurden Forschungslücken erörtert, die bei der geoarchäologischen Interpretation von Magnetfeldanomalien in Magnetogrammen archäologischer Stätten auf braunen Plaggeneschen und in semiterrestrischen Sedimenten bedeutend und gegebenenfalls problematisch sein können. Aus dem Bedarf heraus diese Forschungslücken zu schließen und damit zu robusteren und sichereren Interpretationen von Magnetometerdaten in o. g. Bereichen zu führen ergaben sich für die Untersuchungsgebiete vier Forschungsfragen.

(1) Welche magnetischen Eigenschaften zeigen die braunen Plaggenesche?

Suszeptibilitätsmessungen an Profilen und Proben zeigen, dass magnetisierbare Partikel in Substraten der Plaggenesche nicht geogenen Ursprungs sind. In Unterböden bzw. in Resten natürlicher, sandiger Bodenbildungen, unter den Plaggenauflagen, werden an allen betrachteten Plaggenesch-Standorten sehr niedrige Massen- und Volumenanteile magnetisierbarer Partikel gemessen. Zum Teil zeigen anthropogen-unbeeinflusste bzw. wenig-beeinflusste Bodensubstrate (insbesondere am Oberesch) diamagnetische Eigenschaften, was auf ein gänzlich Fehlen magnetisierbarer Festphasen hindeutet. Dem entgegengesetzt stehen die anthropogenen Eschhorizonte: fast alle Plaggenauflagen und alle Pflughorizonte zeigen hohe Magnetisierbarkeiten und teils hohe Frequenzabhängigkeiten der magnetischen Suszeptibilität, was ein deutlicher Hinweis auf anthropogene oder anthropogen-induzierte remanente Magnetisierungen ist.

Gesteinsmagnetische Messungen an Proben aus Plaggenauflagen zeigen, dass der anthropogen-induzierte, ferrimagnetische PSD-Greigit als dominanter Träger der Magnetisierung in den betrachteten Plaggeneschen vorliegt. Zur Genese der, offensichtlich nicht mehr in ihrer Ausgangsform vorliegenden, Mineralphase konnte eine Hypothese abgeleitet und diskutiert werden. Diese besagt, dass der Greigit ursprünglich auf dem Komposthaufen, im Rahmen des reduktiven Abbaus organischer Substanz, in SD-Form angereichert wurde. Das der Kompostierung anschließende Aufbringen des SD-Greigits, gemeinsam mit den Plaggen, auf den Acker und die ständige Durchlüftung der Plaggenauflagen durch den Pflug, bedingten letztlich ein fortgeschrittenes Oxidationsstadium des gegenwärtig in Eschhorizonten vorliegenden PSD-Greigits. Obwohl diese Hypothese zur Genese des Minerals und seiner Korngröße einer Überprüfung und diskursiven Erörterung bedarf, kann das Vorkommen einer anthropogen-induzierten und -veränderten Form des ferrimagnetischen Eisensulfids in untersuchten Anthroposolen nicht einfach wegdiskutiert werden.

In Übergangsbereichen vom rein terrestrischen Milieu zu temporär stau- und grundwasserbeeinflussten Bodenverhältnissen ist anhand der Suszeptibilitätsparameter eine starke Abnahme dominanter Remanenzträger in Plaggenauflagen festzustellen. Diese Abnahme der NRM wird auf die Auswaschung ferrimagnetischer Greigitphasen und ihrer Oxidationsprodukte im Stau- und/oder Grundwasserschwankungsbereich des Bodenarchivs zurückgeführt (Schnitt 48 am Oberesch). Im Gegensatz dazu belegen Suszeptibilitätsparameter der Plaggenauflagen unter rein terrestrischen Bedingungen (Lechtinger Esch) einen Verbleib der Träger remanenter Magnetisierung im Bodensubstrat.

(2) Wie wirken sich die magnetischen Eigenschaften der braunen Plaggenesche auf die Magnetometerprospektion aus?

Die Auswaschung magnetischer Eisenminerale und damit einhergehende Abschwächung der CRM und/oder der DRM in archäologischen Befunden, die unter den Plaggenauflagen in Stau- und Grundwasserschwankungsbereiche gelangten, bedingt eine starke Abnahme des Suszeptibilitätskontrastes zwischen Befund und Bodenmatrix. Folge dieser Abnahme ist: der Befund ist für den Magnetometer nicht messbar. Dies führt im Fall Oberesch zu äußerst seltenem Auftreten schwach-positiver Anomalien in den Magnetogrammen. Die Störkörper der wenigen positiven Anomalien sind somit entweder im Oberboden (C5 in Abb. 4.1) oder in tieferen Sedimentbereichen (X3 und X4 in Abb. 4.1) zu verorten. Zu Letzteren kann, vor dem Hintergrund der Erkenntnisse am Karlsgraben, eine These ins Auge gefasst werden: die schwach-positiven, großen Anomalien sind auf eine sekundäre Anreicherung magnetischer Eisensulfide im organikreichen Grenzbereich zwischen oxischen und anoxischen Verhältnissen innerhalb einer ehemaligen Senke oder eines ehemaligen Bachlaufs (Paläokanal) zurück zu führen.

Die oben erläuterten Prozesse gelten im speziellen Fall Oberesch aber nur für die CRM und die DRM. Auf das Auftreten anthropogen-erhitzter Strukturen (TRM) in den Magnetogrammen der Plaggenesch-Flächen hat eine temporäre Wassersättigung des Substrats offensichtlich eher positive Auswirkungen: die weichmagnetischen Minerale drehen sich im aufgeweichten Bodensubstrat bzw. Sediment in den Vektor des Erdmagnetfeldes (vgl. mit TRM-Titanomagnetit-Anomalien vom Karlsgraben) und geben sich als thermoremanente Bildungen im Untergrund zu erkennen (s. TRM-Anomalie im Grid Z2 in Abb. 4.1).

In rein terrestrischen Plaggenesch-Bereichen, wie etwa am Lechtinger Esch, ist bei Vorhandensein und Erwerbung von NRM durch geoarchäologische Befunde unter den Eschauflagen, ein häufigeres Auftreten verschiedenartig-remanenter Anomalien in Magnetogrammen zu erwarten. Davon ausgehend, dass die magnetischen Partikel aus den Befunden, ebenso wie aus den Eschauflagen darüber, nicht ausgewaschen werden, kann man eine Erhaltung der erworbenen NRM im Bodenarchiv und somit einen ausreichenden, magnetischen Befund-Bodenmatrix-Kontrast in Plaggeneschen ohne Stau- oder

Grundwassereinfluss in Aussicht stellen. Magnetometer mit ausreichender Tiefenerfassung werden hier sicherlich zufriedenstellende Ergebnisse produzieren können.

(3) Welche Sedimentschichten in den Paläokanälen und den linearen Begleitstrukturen des Karlsgrabens fungieren als Magnetfeldanomalien-erzeugende Störkörper?

Aus  $\kappa$ -Messungen an Innenliner-Bohrungen, die jeweils im Zentrum einer linearen Magnetfeldanomalie (Kanalverlauf und Begleitstruktur) abgeteuft wurden, konnten Sedimentschichten mit ausgeprägten remanenten Magnetisierungen identifiziert werden, die als Störkörper unterschiedliche Anomalien in Magnetogrammen erzeugen. In den Bohrungen aus schwach-positiven, linearen Anomalien, die den Kanalverlauf nachzeichnen, wurden jeweils 2  $\kappa$ -Peaks identifiziert, die gemeinsam als Störkörper fungieren (Abb. 4.13 und 4.18). Eine Verschneidung sedimentologischer Ergebnisse mit  $\kappa$ -Messungen an Sedimentkernen zeigt weiterhin, dass nicht die gesamten organogenen Verfüllungen des Paläokanals als Anomalien-erzeugende Störkörper wirken, sondern einzelne, im Vergleich zu der gesamten organischen Verfüllung, relativ geringmächtige Lagen. Diese beschränken sich zum großen Teil auf besonders organikreiche Substrate (>15%) (Abb. 4.18). Bereits diese ersten Ergebnisse deuten auf eine postsedimentäre Remagnetisierung der, als Störkörper fungierenden, Lagen. Anders als die, im Vorfeld als TRM-klassifizierten, Störkörper der Begleitstrukturen. Diese zeigen bei einer Verschneidung von sedimentologischen Ansprachen mit  $\kappa$ -Messungen in ihrer gesamten Mächtigkeit sehr hohe  $\kappa$ -Werte, im Vergleich zur anstehenden Sedimentmatrix (Abb. 4.14). Für diese Lagen kann somit ebenfalls bereits nach den ersten  $\kappa$ -Messungen behauptet werden, dass sie ihre TRM präsedimentär erworben haben. Es ist ferner anzunehmen, dass die mächtigere, stratigraphisch jüngere der beiden Schichten, aufgrund ihrer viel höheren Volumenszeptibilität die tiefer liegende Schicht magnetisch überlagert und somit die Hauptverantwortung als Anomalien-Erzeuger der intensiven linearen Anomalie trägt.

(4) Welche magnetische Mineralphasen in den Störkörpern sind für das Auftreten des Grabenverlaufs und seiner Begleitstrukturen in den Magnetometerdaten des Karlsgrabens verantwortlich?

Vertreter beider Gruppen, der magnetischen Eisenoxide und Eisensulfide, treten als Erzeuger der untersuchten Magnetfeldanomalien am Karlsgraben auf. Bei Ersteren handelt es sich um anthropogen-eingebrachte, hochoverhitze und weichmagnetische Titanomagnetite. Ihre hohe magnetische Viskosität bedingt ein Auftreten des linearen Störkörpers als intensive, thermoremanente Anomalie in den Magnetogrammen. Offensichtlich jedoch nur in den Bereichen des Karlsgrabens in denen die TRM-Titanomagnetit-haltigen Substrate vom Grundwasser beeinflusst werden.

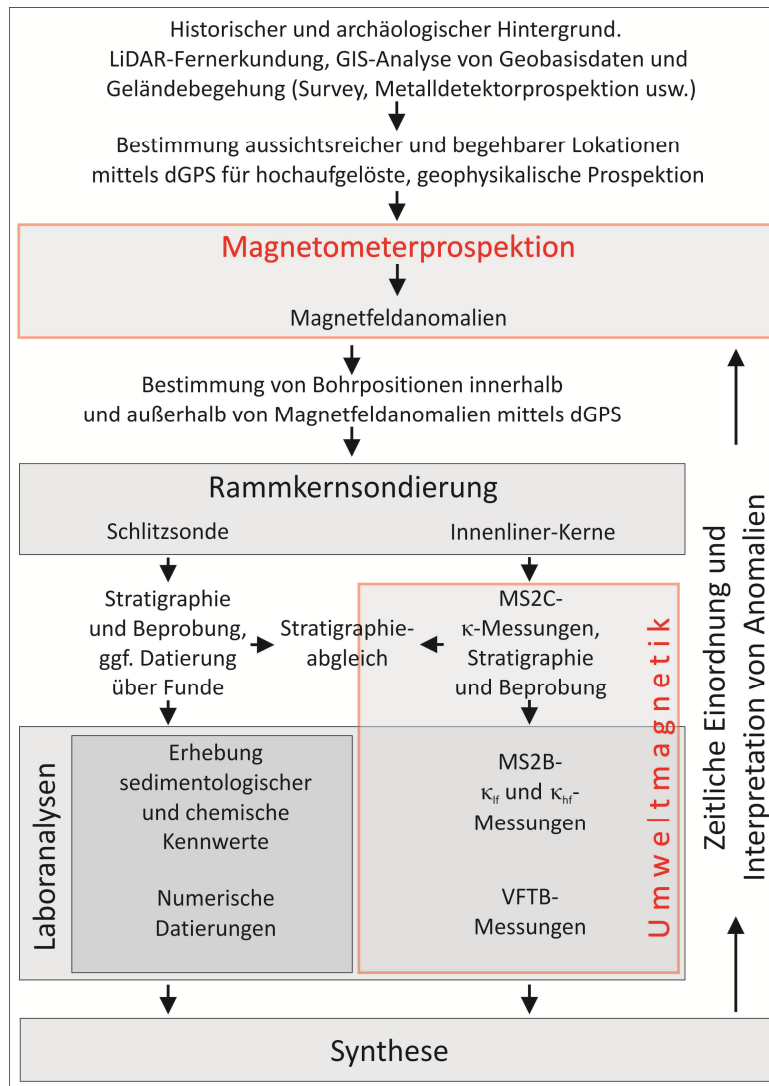
Gänzlich im grundwassergesättigten Milieu und Tiefenniveau befinden sich die CRM-Träger, die für das Erscheinen des Grabenverlaufs als schwach-positive Anomalien in den Magnetogrammen verantwortlich gemacht werden können: die sekundär-angereicherten SD-Greigite. In den Sediment-

säulen treten sie in unterschiedlicher Anreicherungsintensität und teils unterschiedlicher Domänenstruktur auf. Dies kann als Folge einer Verlagerung der oxisch/anoxischen Übergangszone im Rahmen der Verlandung des Kanals interpretiert und diskutiert werden.

## 5.2 Perspektiven

In vorliegender Arbeit wurden zwei unterschiedliche, Aufschlussart-bedingte, Herangehensweisen vorgestellt, wie man sich unter Zuhilfenahme angewandter, umweltmagnetischer Verfahren einem besseren Verständnis von Magnetometermessungen in terrestrischen und semiterrestrischen, geoarchäologischen Kontexten nähern kann. Ergebnisse der vorliegenden Arbeit haben außerdem gezeigt, dass für ein effektives Vorgehen bei der Klärung von Magnetfeldanomalien die methodische und messtechnische Herangehensweise vom Karlgraben sehr ertragreich sein kann. Denn nur selten können Wissenschaftler alle Magnetfeldanomalien durch Ausgrabungen überprüfen. Insbesondere solche Anomalien, deren Bedeutung für die Archäologie und ihre naturwissenschaftliche Schwester Geoarchäologie vorab schwer eingeschätzt werden kann. Die explorative, datierungsgestützte Karlgraben-Methode (Abb. 5.1) könnte einer Entscheidung zur Ausgrabung bzw. tiefergehender Untersuchung einer Magnetfeldanomalie Abhilfe leisten. In den Phasen zwischen Erkundung (inklusive Magnetometerprospektion) und Ausgrabung kann diese Vorgehensweise als eine schnelle und minimalinvasive Methode zur Überprüfung von Magnetogramm-Befunden eingesetzt werden. Sie wäre bei großflächigen, archäologischen Arealen und eingeschränkten Ausgrabungsmöglichkeiten von Vorteil. Vor allem aber im schwierigen Terrain, wo etwa bei hoch anstehendem Grundwasser die Grabungstechnik besonders gefordert ist und große Gefahr besteht, dass sich vermeintliche archäologische Strukturen nach einer aufwändigen, teuren Ausgrabung als junge, archäologisch-unbedeutende Remagnetisierungen entpuppen.

Um auf große archäologische Areale, wo bereits Magnetogramme mit fraglichen Magnetfeldanomalien vorliegen, zurückzukommen, wäre es sehr lohnenswert und aussichtsreich, die datierungsgestützte Karlgraben-Methode zur Klärung der Magnetfeldanomalien am Oberesch anzuwenden. Da hier die meisten detektierten Magnetfeldanomalien noch nicht geklärt sind, wäre insbesondere eine Verschneidung der Umweltmagnetik mit der geoarchäologisch-ausgerichteten Betrachtung der Böden und Sedimente aussichtsreich (s. die auf die Rammkernsondierung folgende Vorgehensweise in Abb. 5.1). Erste, magnetometrische Vorarbeiten dafür liegen in Form dieser Arbeit vor. Für die Umweltmagnetik wären Ergebnisse aus dieser Verschneidung und einhergehender, gesteinsmagnetischer (VFTB-) Messungen an Plaggeneschen hoch interessant, weil sie zu einer Verdichtung der Daten zu oxidierten, ferrimagnetischen Eisensulfid-Eisenoxid-Übergangsstadien im SD-PSD-Domänenstatus der Greigite beitragen würden.



**Abbildung 5.1: Schematische Darstellung der Karlsgraben-Methode als minimalinvasive Vorgehensweise zur datierungsgestützten Interpretation von (größeren) Magnetfeldanomalien. Rot sind methodische Bereiche und Disziplinen gekennzeichnet, die der Lehre des Magnetismus entspringen.**

Für die Geoarchäologie als junge Disziplin, welche die Suszeptibilitätsmessungen ohnehin bereits in ihrem Forschungsdesign fest verankert hat (s. z. B. bei Brückner (2011)), wäre es in Zukunft wünschenswert, dass VFTB-Messungen an geoarchäologischen Substraten eine breitere Anwendung finden. Denn, wie im Vorfeld erläutert und in beiden Untersuchungsgebieten gezeigt, sind die umweltmagnetischen Verfahren zu mehr, als nur zur Verfeinerung der Stratigraphie und zur Entdeckung vulkanischer Aschelagen, zu gebrauchen. Eine breitere Anwendung der angewandten Umweltmagnetik in der Geoarchäologie würde zu positiven Synergien zwischen den beiden wachsenden Disziplinen führen und zum besseren Verständnis von Auffälligkeiten in den Suszeptibilitätsparametern geologisch jünger Sedimente und Böden beitragen.

Für die Pedogenese und für ein grundsätzliches Verständnis von Entstehungs-, Verlagerungs- und Anreicherungspfaden von Eisenverbindungen in Böden und Ausgangssubstraten bergen umweltmagnetische Verfahren große Potentiale. Vor dem Hintergrund mannigfaltiger menschlicher und natürlicher Quellen, aus denen die magnetischen Verbindungen stammen können, besitzen Ergebnisse aus

umweltmagnetischen Methoden die Fähigkeit entscheidende Hinweise zur Substratgenese zu liefern. Es eröffnen sich weiterhin Einsatzmöglichkeiten in der Erforschung des an Eisen gebundenen Teils des Schwefelkreislaufes in semiterrestrischen Bodenmilieus, wie Marschböden, Organomarschen, organikreichen Auenböden und Niedermooren. In Letzteren wurden vom Autor selbst bereits magnetische Eisensulfide gemessen und ähnliche  $\kappa$ -Muster wie in den verlandeten Paläokanälen des Karlsgrabens beobachtet (die Messungen wurden an einem Niedermoorprofil im Essener Bruch (Abb. 3.6) durchgeführt). Von den semiterrestrischen Umgebungen abgesehen, ist auch die Dynamik und Anreicherung anthropogener und anthropogen-induzierter, magnetischer Eisenverbindungen in Humusauf-lagen, Oberböden und Anthroposolen noch lange nicht gänzlich erforscht, wie es der vorliegende, erstmalige Nachweis magnetischer Eisensulfide in anthropogenen Oberböden verdeutlicht.

Und so äußert sich der immer fortwährende Lauf der Forschung auch in vorliegender Untersuchung damit, dass man beim Versuch einigen wenigen Fragen nachzugehen auf noch mehr Fragen stößt. Einem ununterbrochenen Fluss gleich, wird dieser Lauf der Forschung aus der Quelle des ständigen forschenden Fragens gespeist. So sollen, als Abschluss der vorliegenden Dissertation und als Betrag zur Speisung des Flusses der Forschung, weiterführende Fragen formuliert werden:

- Welche magnetischen Eigenschaften zeigen die grauen Plaggenesche?
- Wie verändern sich die magnetischen Eigenschaften und Magnetominerale der Plaggenesche mit der Tiefe?
- Lassen sich in hügeligen Landschaften Nordwestdeutschlands mit Hilfe umweltmagnetischer Messungen Plaggenauflagen von Kolluvien unterscheiden?



## Literaturverzeichnis

Ad-hoc-AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 5. Aufl.

Aitken, M. J. (1958): Magnetic prospecting: I – The Water Newton Survey. In: *Archaeometry*, 1, 24-29

Akimoto, S. (1962): Magnetic properties of FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> system as a basis of rock magnetism. In: *Journal of the Physical Society of Japan*, 17 (suppl. B1), 706-710

ArcTron 3D GmbH (2009): Dettenheim, Kreis Weißenburg-Gunzenhausen. Archäologische 3D Dokumentation von Geländedenkmälern mit Airborne Laserscanning (LiDAR) Technologien. Vom Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege (BLfD) überreichtes Manuskript.

Aspinal, A., Gaffney, C., Schmidt, A. (2008): *Magnetometry for Archaeologists*. Lanham (u. a.): AltaMira Press

Ball, D. F. (1964): Loss-on-ignition as an estimate of organic matter and organic carbon in non-calcareous soils. In: *Journal of Soil Science*, 15 (1), 84-92

Bartington, G. & Chapman, C. E. (2004): A High-stability Fluxgate Magnetic Gradiometer for Shallow Geophysical Survey Applications. In: *Archaeological Prospection* 11, 19-34

Bartington Instruments Ltd. (2016a): MS2/MS3 Magnetic Susceptibility System Operation Manuals. <http://www.bartington.com/ms2-ms3-operation-manuals> (13.09.2016)

Bartington Instruments Ltd. (2016b): Operation Manual for Grad601 Single Axis Magnetic Field Gradiometer System.

<http://bartingtoninstruments.ormecreative.co.uk/Literaturepdf/Operation%20Manuals/GRAD601%20OM1800.pdf> (29.09.16)

Bayerisches Landesamt für Vermessung und Geoinformation (BLfVG) (2012): Geobasisdaten der Bayerischen Vermessungsverwaltung als Vektordaten im .shp-Format.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2016): WMS-Dienst Wassersensibler Bereich. [http://www.lfu.bayern.de/umweltdaten/geodatendienste/index\\_detail.htm?id=c9ad9b85-7520-46eb-9f34-09166bf186a7&profil=WMS](http://www.lfu.bayern.de/umweltdaten/geodatendienste/index_detail.htm?id=c9ad9b85-7520-46eb-9f34-09166bf186a7&profil=WMS) (15.11.16)

Bazylinski, D. A., Heywood, B. R., Mann, S., Frankel, R. B. (1993): Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and Fe<sub>3</sub>S<sub>4</sub> in a bacterium. In: *Nature*, 366 (6452), 218-218

- Becker, H. (1996): Die magnetische Prospektion. In: Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Band 59 „Archäologische Prospektion Luftbildarchäologie und Geophysik“, 73-76
- Becker, H. (2000): Magnetische Prospektion in der Archäologie. In: Beiträge des DGG-Kolloquiums „Magnetik in der Geophysik“. <http://www.dgg-online.de/mitteilungen/sonderhefte/magnetik.html> (07.09.16)
- Behre, K.-E. (1976): Beginn und Form der Plaggenwirtschaft in Norddeutschland nach pollenanalytischen Untersuchungen in Ostfriesland. In: Neue Ausgrabungen und Forschungen in Niedersachsen, Bd. 10, 197-224, Kiel/Hamburg: Wachholz Verlag.
- Behre, K.-E. (2008): Landschaftsgeschichte Norddeutschlands. Neumünster: Wachholz Verlag.
- Benning, L. G., Wilkin, R. T., Barnes, H. L. (2000): reaction pathways in the Fe-S system below 100°C. In: Chemical geology, 167, 25-51
- Berg-Hobohm, S., Ettel, P., Leitholdt, E., Werther, L., Zielhofer, C. (2014a): Prolog. In: Ettel, P., Daim, F., Berg-Hobohm, S., Werther, L., Zielhofer, C. (Hg.): Großbaustelle 793. Das Kanalprojekt Karls des Großen zwischen Rhein und Donau. Mainz: Verlag des Römisch-Germanischen Zentralmuseums.
- Berg-Hobohm, S., Linzen, S., Faßbinder, J. W. E. (2014b): Neue Forschungsergebnisse am Karlgraben durch geophysikalische Messmethoden. In: Denkmalpflege Informationen des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, 157, 25-27
- Berg-Hobohm, S. & Werther, L. (2014): Das rezente Erscheinungsbild des Karlsgrabens. In: Ettel, P., Daim, F., Berg-Hobohm, S., Werther, L., Zielhofer, C. (Hg.): Großbaustelle 793. Das Kanalprojekt Karls des Großen zwischen Rhein und Donau. Mainz: Verlag des Römisch-Germanischen Zentralmuseums.
- Berghausen, K. (2013): Magnetometrische Untersuchungen an spätkeltischen Viereckschanzen in Bayern. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades. München: Fakultät für Geowissenschaften der Ludwig-Maximilians-Universität.
- Berner, R. A. (1984): Sedimentary pyrite formation: An update. In: Geochimica et Cosmochimica Acta, 48, 605-616
- BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie) (2010): Digitales Basis-Landschaftsmodell (Basis-DLM AAA) im Vektordatenformat. Frankfurt am Main: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (Hg.).
- Bisutti, I., Hilke, I., Raessler, M. (2004): Determination of total organic carbon – an overview of current methods. In: Trends in Analytical Chemistry, 23 (10-11), 716-726

- Bleil, U. (2000): Umweltmagnetik – Methoden und Möglichkeiten. In: Beiträge des DGG-Kolloquiums Magnetik in der Geophysik. <http://www.dgg-online.de/mitteilungen/sonderhefte/magnetik.html> (07.09.16)
- Blume, H.-P., Stahr, K., Leinweber, P. (2011): Bodenkundliches Praktikum. 3. Aufl. Heidelberg: Spektrum.
- Bleck, R. D. (1965): Zur Durchführung der Phosphatmethode. In: Ausgrabungen und Funde, 10, 213-218
- Bork, H.-R., Meller, H., Gerlach, R. (Hg.) (2011): Umweltarchäologie – Naturkatastrophen und Umweltwandel im archäologischen Befund: 3. Mitteldeutscher Archäologentag vom 07. bis 09. Oktober 2010. Halle (Saale): Landesamt f. Denkmalpflege u. Archäologie Sachsen-Anhalt.
- Boyle, J. (2004): A comparison of two methods for estimating the organic matter content of sediments. In: *Journal of Paleolimnology*, 31, 125-127
- Boyko, T, Scholger, R., Stanjek, H (2004): Topsoil magnetic susceptibility mapping as a tool for pollution monitoring: repeatability of in situ measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 55, 249-259
- Bridge, J. & Demicco, R. (2008): *Earth Surface Processes, Landforms and Sediment Deposits*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Brückner, H. (2011): Geoarchäologie in Forschung und Lehre. In: Bork, H.-R., Meller, H., Gerlach, R. (Hg.): *Umweltarchäologie – Naturkatastrophen und Umweltwandel im archäologischen Befund: 3. Mitteldeutscher Archäologentag vom 07. bis 09. Oktober 2010*. Halle (Saale): Landesamt f. Denkmalpflege u. Archäologie Sachsen-Anhalt.
- Bußmann, J. (2014): *Holozäne Sedimentdynamik im Umfeld der Varusschlacht*. Osnabrück: Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades des Fachbereichs Kultur- und Geowissenschaften der Universität Osnabrück
- Butler, R. F. (2004): *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes*. Electronic Edition. <http://www.pmc.ucsc.edu/~njarboe/pmagresource/> (07.09.2016)
- Carey, S. & Sigurdson, H. (1985): The May 18, 1980 eruption of Mount St. Helens II.: Modelling of dynamics of the plinian phase. In: *Journal of Geophysical Research*, 90 (B4), 2948-2958
- Carvallo, C. (2000): *Archeomagnetism of Ontario potsherds: Applications to the dating and orientation of pottery*. M. Sc. Thesis, University of Toronto.

- Casas, L., Shaw, J., Gich, M., Share, J. A. (2005): High-quality microwave archaeointensity determinations from an early 18<sup>th</sup> century AD English brick kiln. In: *Geophysical Journal international*, 161, 653-661
- CCM2 (Catchment Characterisation and Modelling) (2016): CCM River and Catchment Database, version 2.1 (CCM2). <http://ccm.jrc.ec.europa.eu/php/index.php?action=view&id=23> (15.11.2016)
- Collinson, D. W. (1983): *Methods in rock magnetism and paleomagnetism*. London New York: Chapman and Hall.
- Cornell, R. M., & Schwertmann, U. (2003): *The Iron Oxides*. Weinheim: WILEY-VCH GmbH & Co. KGaA.
- Cui, Y. & Verosub, K. L. (1995) A mineral magnetic study of some pottery samples: Possible implications for sample selection in archaeointensity studies. In: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 91, 261-271
- Cullity, B. D. & Graham, C. D. (2009): *Introduction to Magnetic Materials*. Hoboken, New-Jersey: John Wiley & Sons Inc.
- Cuypers, C., Grotenhuis, T, Nierop, K. G. J., Franco, E. M., de Jager, A., Rulkens, W. (2002): Amorphous and condensed organic matter domains: the effect of persulfate Oxidation on the composition of soil/sediment organic matter. In: *Chemosphere*, 48, 919-931
- Dalan, R. A. & Banerjee S. K. (1998): Solving Archaeological Problems Using Techniques of Soil Magnetism. *Geoarchaeology*, 13, 1, 3-36
- Danielson, J. J. & Gesch, D. B. (2011): Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010). U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1073.
- Day, R., Fuller, M., Schmidt, V. A. (1977) Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain size and composition dependence. In: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 13, 260-267
- Dearing, J. A., Dann, R. J. L., Hay, K., Lees, J. A., Loveland, P. J., Maher, B. A., O'Grady, K. (1996): Frequency-dependent susceptibility measurements of environmental materials. *Geophysical Journal International*, 124, 228-240
- Dearing, J. A. (1999): *Environmental magnetic susceptibility. Using the Bartington MS2 System*. Kenilworth, Chi Publ.
- Dekkers, M. J. (1997): Environmental magnetism: an introduction. In: *Geologie en Mijbouw*, 76, 163-182

- Dent, D. (1986): Acid sulphate soil: a baseline for research and development. Wageningen: ILRI publication 39.
- Dobeneck, T. von, Petersen, N., Vali, H. (1987): Bakterielle Magnetofossilien. In: Geowissenschaften in unserer Zeit, 1, 27-35
- Dunlop, D. J. (2002a): Theory and application of the Day plot (MRS/MS versus HCR/HC) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. In: Journal of Geophysical Research, 107, EPM 4-1 - EPM 4-21
- Dunlop, D. J. (2002b): Theory and application of the Day plot (MRS/MS versus HCR/HC) 2. Application to data for rocks, sediments, and soils. In: Journal of Geophysical Research, 107, EPM 5-1 – EPM 5-15
- Dunlop, D. J. & Özdemir, Ö. (1997): Rock Magnetism. New York: Cambridge University Press
- Du Trémolet de Lacheisserie, É., Gignoux, D., Schlenker, M. (Ed.) (2005): Magnetism Materials and Applications. New York: Springer.
- Eckelmann, W. (1980): Plaggenesche aus Sanden, Schluffen und Lehmen sowie Oberflächenveränderungen als Folge der Plaggeneschwirtschaft in den Landschaften des Landkreises Osnabrück. Geologisches Jahrbuch, Reihe F Bodenkunde, Heft 10. Hannover: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- Engelhardt, W. v. (1997): Suevite breccia of the Ries impact crater, Germany: Petrography, chemistry and shock metamorphism of crystalline rock clasts. In: Meteoritics & Planetary Science, 32, 545-554
- Esri (Hg.) (2010): ArcGIS 10 Desktop (Education Edition) Tutorial and Basemap Data (DVD).
- Esri (2016): Kurzer Überblick über Referenzen für Geoverarbeitungswerkzeuge.  
<https://desktop.arcgis.com/de/arcmap/latest/tools/main/a-quick-tour-of-geoprocessing-tool-references.htm> (05.10.2016)
- Ettel, P., Daim, F., Berg-Hobohm, S., Werther, L., Zielhofer, C. (Hg.) (2014): Großbaustelle 793. Das Kanalprojekt Karls des Großen zwischen Rhein und Donau. Mainz: Verlag des Römisch-Germanischen Zentralmuseums.
- Evans, M. E. & Heller, F. (1994): Magnetic enhancement and palaeoclimate: study of a loess/palaeosol couplet across the Loess Plateau of China. In: Geophysical Journal International, 117, 257-264
- Evans, M. E. & Heller, F. (2003): Environmental Magnetism. Principles and Applications of Environmental Magnetism. Amsterdam (u. a.): Academic Press.

- Fabian, K. (2003): Some additional parameters to estimate domain state from isothermal magnetization measurements. In: *Earth and Planetary Science Letters*, 213, 337-345
- Fassbinder, J. W. E., Stanjek, H., Vali, H. (1990): Occurrence of magnetic bacteria in soil. In: *Nature*, 343, 161-163
- Fassbinder, J. W. E. & Stanjek, H. (1993): Occurrence of bacterial magnetite in soils from archaeological sites. In: *Archaeologia Polona*, 31, 117-128
- Fassbinder, J. W. E. & Stanjek, H. (1994): Magnetic properties of biogenic soil greigite ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ). In: *Geophysical Research Letters*, 21 (22), 2349-2352
- Faßbinder, J. W. E. (1994): Die magnetischen Eigenschaften und die Genese ferrimagnetischer Minerale in Böden im Hinblick auf die magnetische Prospektion archäologischer Bodendenkmäler. Buch am Erlbach: Verlag Marie L. Leidorf.
- Faßbinder, J. W. E. (2008): Methodische Untersuchungen zur Magnetometerprospektion in der Archäologie. Habilitationsschrift. Fakultät für geowissenschaften der Ludwig-Maximilians-Universität München. Persönlich überreichtes Manuskript.
- Fassbinder, J. W. E. (2009): Geophysikalische Prospektionsmethoden – Chancen für das archäologische Erbe. In: Emmerling, E. (Hg.): *Tocare – Non Tocare*, ICOMOS, Hefte des Deutschen Nationalkomitees, 47. München: Siegl, 10-32
- Fassbinder, J. W. E. & Bondar, K. (2013): Geophysikalische Prospektion und magnetische Eigenschaften von ausgewählten Böden der Osterinsel. In: *Zeitschrift für Archäologie Außereuropäischer Kulturen*, 5, 113-140
- Fassbinder, J. W. E. (2015): Seeng beneath the farmland, steppe and desert soil: magnetic prospecting and soil magnetism. In: *Journal of Archaeological Science*, 56, 85-95
- Gaffney, G. (2008): Detecting trends in the prediction of the buried past: a review of geophysical techniques in archaeology. In: *Archaeometry*, 50 (2), 313-336
- Gall, B., Lantsch, P., Kersting, T. (2013): Böden als Archive der Kulturgeschichte. In: *Bodenschutz*, 18 (2), 58-63
- GDNRW (Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen) (Hg.) – BK 50 (2014): Vektorbasierte Bodenkarte 1 : 50 000 im .shp-Format

- GKfW (Geographische Kommission für Westfalen Landschaftsverband Westfalen-Lippe) (Hg.) (1986): Geographisch-landeskundlicher Atlas von Westfalen. Doppelblatt Niederschläge in Raum-Zeitlicher Verteilung. Münster: Aschendorff.
- Geoscan Research (2007): GEOPLOT Version 3.0 for Windows. Instruction Manual 1.97.
- Göttlich, K. (Hg.) (1990): Moor- und Torfkunde. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung
- Greiten, U. (2013): Plaggenesch, ein Boden Norddeutschlands mit hoher Archivfunktion am Beispiel der Stadt Osnabrück. In: Bodenschutz, 18 (2), 49-51
- Grimmley, D. A., Wang, J.-S., Liebert, D. A., Dawson, J. O. (2008): Soil Magnetic Susceptibility: A Quantitative Proxy of Soil Drainage for Use in Ecological Restoration. In: Restoration Ecology, 16 (4), 657-667
- Hall, F. R., Cisowski, S., King, J. W. (1997): 13. Magnetic hysteresis properties of fine-grained magnetic iron sulfide nodules and crusts on the amazon fan. In: Flood, R. D., Piper, D. J. W., Klaus, A. Peterson, L. C. (Hg.) (1997): Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol. 155
- Hammen, T. van der (1965): Klokkenberg bij Denekamp: a geological-palynological study of a Twentse esch soil. In: Tijdschr. Kon. Ned. Aardr. Gen., 82 (2), 123-134. [Zitiert nach Eckelmann 1980]
- Hammer, Ø. (2015): PAST Paleontological Statistics Version 3.10 Reference manuals. University of Oslo: Natural History Museum.
- Hanesch, M & Scholger, R. (2002): Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements. In: Environmental Geology, 42, 857-870
- Hanesch, M & Scholger, R. (2005): The influence of soil type on the magnetic susceptibility throughout soil profiles. In: Geophysical Journal International, 161, 50-56
- Hanesch, M., Stanjek, H., Petersen, N. (2006): Thermomagnetic measurements of soil iron minerals: the role of organic carbon. In: Geophysical Journal International, 165, 53-61
- Hartge, K.-H. (1983): Böden als Teile von Systemen. In: Catena 10, 105-114
- Heller, F. & Liu, T. S. (1984): Magnetism of Chinese loess deposits. In: Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 77, 125-141
- Hemetsberger, S. & Scholger, R. (2006): Umweltmagnetik im Raum Trofaiach bis Eisenerz (steirische Eisenstrasse). In: Mitt. Naturwiss. Ver. Steiermark, Band 135, 13-24

- Hesse, P. & Stolz, J. F. (1999): Bacterial magnetite and the Quaternary climate record. In: Maher, B. A. & Thompson, R. (Ed.) Quaternary Climates, Environments and Magnetism. Cambridge University Press.
- Hilzinger, R. & Rodewald, W. (2013) Magnetic Materials. Erlangen: Publicis.
- Hinze, C. (1979): Geol. Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erl. Blatt 3614 Wallenhorst. Hannover: Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung.
- Hinze, C. (1983): Geol. Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erl. Blatt 3616 Preußisch Oldendorf. Hannover: Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung.
- Hinze, C. & Meyer, K.-D. (1984): Quartär. In: Klassen, H. (Hg.): Geologie des Osnabrücker Berglandes. Osnabrück: Naturwissenschaftliches Museum.
- Hoffmann, V. (1990): Greigite ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ): magnetic properties and first domain observations. In: Physics of the Earth and Planetary Interiors, 70, 288-301
- Horsley, T., Wright, A., Barrier, C. (2014): Prospecting for New Questions: Integrating Geophysics to Define Anthropological Research Objectives and Inform Excavation Strategies at Monumental Sites. Archaeological Prospection, Wiley Online Library DOI: 10.1002/arp.1476
- Howard, P. J. A. and Howard, D. M. (1990): Use of organic carbon and loss-on-ignition to estimate soil organic matter in different soil types and horizons. In: Biology and Fertility of Soils, 9, 306-310
- Isambert, A., Letard, I., Gloter, A., Valet, J. P., Guyot, F. (2003): Mechanisms of oxidation of natural greigite ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ). In: EGS – AGU - EUG Joint Assembly, Abstracts from the meeting held in Nice, France, 6-11 April 2003, abstract #8904
- Jätzold, R. (1962): Die naturräumlichen Einheiten auf Blatt 172 Nördlingen. Bad Godesberg: Selbstverlag der Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung.
- Jelinowska, A., Tucholka, P., Guichard, F., Lefèvre, I., Badaut-Trauth, D., Chalié, F., Gasse, F., Tribovillard, N., Desprairies, A. (1998): Mineral magnetic study of Late Quaternary South Caspian Sea sediments: palaeoenvironmental implications. In: Geophysical Journal International, 133, 499-509
- Jiles, D. (1991): Introduction to Magnetism and Magnetic Materials. London (u. a.): Chapman and Hall.
- Kirenski, L. W. (1969): Magnetismus. Leipzig: BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft.
- Klassen, H. (1984): Malm. In: Klassen, H. (Hg.): Geologie des Osnabrücker Berglandes. Osnabrück: Naturwissenschaftliches Museum.



Konhauser, K. (2007): *Introduction To Geomicrobiology*. Malden, Oxford, Carlton: Blackwell Publishing.

Krasa, D., Petersen, K., Petersen, N. (2007): Variable Field Translation Balance. In: Gubbins, D. & Herrero-Bervera, E. (Ed.): *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*. Dordrecht (NL): Springer.

Krüger, K., Burgbaum, B., Fleige, H., Gehrt, E., Giani, L., Gröngröft, A. (2011): Neues zu den Böden der Marsch - Profilprägende Prozesse, Merkmale und Kennzeichnung -. Tagungsbeitrag zur Jahrestagung der DBG (Kommission V). In: *Böden verstehen - Böden nutzen - Böden fit machen*, 3. - 9. September 2011, Berlin.

LABO - Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (Hg.) (2010): *Archivböden - Empfehlungen zur Bewertung und zum Schutz von Böden mit besonderer Funktion als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte*. Vorhaben B 1.09: Bodenfunktion "Archiv der Natur- und Kulturgeschichte" des Länderfinanzierungsprogramms Wasser, Boden, Abfall, Teil Boden der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO), Bearbeitung: Dr. Silvia Lazar (ahu AG), Britta Schippers (BKR Aachen), <https://www.labo-deutschland.de/> (24.08.2016)

Lang, G. (1994): *Quartäre Vegetationsgeschichte Europas. Methoden und Ergebnisse*. Jena (u. a.): Fischer Verlag.

Langer, A., Pluquet, E., Larm, A. (o. J.): *Untersuchungen zur Freisetzung von Sulfat aus Böden und Gesteinen in Niedersachsen*. LBEG Hannover.

Lantzsch, P., Lazar, S., Oechtering, E., Schippers, B. (2013): Böden als Archive der Natur und Kulturgeschichte – Leitfaden der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz. In: *Bodenschutz*, 18 (2), 40-44

LBEG (Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen) (Hg.) – BK-25 (2011): Vektorbasierte Bodenkundliche Karte 1 : 25 000 im .shp-Format

LBEG (Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen) (Hg.) – GK-25 (2011): Vektorbasierte Geologische Karte 1 : 25 000 im .shp-Format

LBEG (Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen) (Hg.) – BÜK-50 (2014): Vektorbasierte Bodenübersichtskarte 1 : 50 000 im .shp-Format

Le Borgne, E. (1955): Susceptibilité magnétique anormale du sol superficiel. In: *Annales de Géophysique*, 11 (4), 399-419

Le Borgne, E. (1960): Influence du feu sur les propriétés magnétiques du sol et sur celles du schist et du granite. In: Annales de Géophysique, 16 (2), 169-195

Le Borgne, E. (1965): Les propriétés magnétiques du sol. Application à la prospection des sites archéologiques. In: Archaeo-Physika, Köln Graz: Böhlau Verlag.

Leitholdt, E., Zielhofer, C., Bussmann, J., Stele, A. (2014): Durchbruch der Europäischen Hauptwasserscheide. Der zentrale Bereich der Fossa Carolina – offene Wasserflächen und Verlandungsgeschichte. In: Ettl, P., Daim, F., Berg-Hobohm, S., Werther, L., Zielhofer, C. (Hg.) (2014): Großbaustelle 793 Das Kanalprojekt Karls des Großen zwischen Rhein und Donau. Mainz: Verlag des Römisch-Germanischen Zentralmuseums.

Leitholdt, E. (2014): Der Karlsgraben: Überwindung der Europäischen Hauptwasserscheide auf dem Wasserweg – Rekonstruktion der Kanalanlage und deren Sedimentationsgeschichte vom Frühmittelalter bis heute. Dissertation am Institut für Geographie der Universität Leipzig. Persönlich überreichtes Manuskript.

Leonhardt, R. (2006): Analyzing rock magnetic measurements: The RockMagAnalyzer 1.0 software. In: Computer & Geosciences, 32, 1420-1431

LGLN (Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen) (Hg.) – DGM-5 (2011): Rasterbasiertes Digitales Geländemodell in 10X10m-Kacheln und .asc-Format.

LGLN (Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen) (Hg.) – DGM-50 (2013): Rasterbasiertes Digitales Geländemodell in 50X50m-Kacheln und .asc-Format.

LGLN (Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen) (Hg.) – DLM-50 (2013): Vektorbasierte Geometrien des Digitalen Landschaftsmodells 1 : 50 000 im .shp-Format

LGLN (Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen) (2016): Digitale Geländemodelle (DGM) Einsatzmöglichkeiten.

[http://www.lgln.niedersachsen.de/startseite/geodaten\\_karten/3dgeobasisdaten/dgm/digitale-gelaendemodelle--dgm-143150.html](http://www.lgln.niedersachsen.de/startseite/geodaten_karten/3dgeobasisdaten/dgm/digitale-gelaendemodelle--dgm-143150.html) (29.09.2016)

Lienemann, J. & Tolksdorf-Lienemann, E. (1992): Bodenkundliche Untersuchungen im Zusammenhang mit den Ausgrabungen auf dem Oberesch in Kalkriese, Stadt Bramsche, Landkreis Osnabrück. In: Germania, 70, 335-344

Linford, N. T. (2003): The Application of Environmental Magnetism to Archaeological Prospection. Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. London: Department of Earth Sciences University College.

- Linford, N., Linford, P., Martin, L., Payne, A. (2007): Recent Results from the English Heritage Caesium Magnetometer System in Comparison with Recent Fluxgate Gradiometers. In: *Archaeological Prospection*, 14, 151-166
- Linzen, S. & Schneider, M. (2014): Der Karlsgraben im Fokus der Geophysik. In: Ettl, P., Daim, F., Berg-Hobohm, S., Werther, L., Zielhofer, C. (Hg.) (2014): *Großbaustelle 793 Das Kanalprojekt Karls des Großen zwischen Rhein und Donau*. Mainz: Verlag des Römisch-Germanischen Zentralmuseums.
- Liu, Q., Roberts, A. P., Larrasoana, J. C., Banerjee, S. K., Guyodo, Y., Tauxe, L., Oldfield, F. (2012): Environmental Magnetism: Principles and Applications. In: *Reviews of Geophysics*, 50, RG4002/2012 1-50
- Maher, B. A. (1986): Characterisation of soils by mineral magnetic measurements. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 42, 76-92
- Maher, B. A., & Taylor, R. M. (1988): Formation of ultrafine-grained magnetite in soils. In: *Nature*, 336, 368-370
- Maher, B. A. & Thompson, R. (Ed.) (1999): *Quaternary Climates, Environments and Magnetism*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Maher, B. A., Thompson, R., Hounslow, M. W. (1999) Introduction. In: Maher, B. A. & Thompson, R. (Ed.) *Quaternary Climates, Environments and Magnetism*. Cambridge University Press.
- Maher, B. A (2011): The magnetic properties of Quaternary aeolian dusts and sediments, and their palaeoclimatic significance. In: *Aeolian Research*, 3 (2), 87-144
- Makowsky, L., Mueller, K., Giani, L. (2013): Steckbrief Boden: Plaggenesch. In: *Bodenschutz*, 18 (2), 45-48
- Mansfeldt, T. (1994): Schwefeldynamik von Böden des Dithmarscher Speicherkoog und der Bornhöveder Seenkette in Schleswig-Holstein. Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 38, Universität Kiel.
- Meier-Uhlherr, R., Schulz, C., Luthardt, V. (2015): *Steckbriefe Moorsubstrate*. HNE Eberswalde (Hrsg.), Berlin., 2., unveränd. Aufl.
- Meisel, S. (1959): Die naturräumlichen Einheiten auf Blatt 85 Minden. Remagen: Selbstverlag der Bundesanstalt für Landeskunde.
- Meisel, S. (1961): Die naturräumlichen Einheiten auf Blatt 83/84 Osnabrück-Bentheim. Bad Godesberg: Selbstverlag der Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung.

- Meisel, S. (1962): 53 Unteres Weserbergland. In: Meynen, E., Schmithüsen, J., Gellert, J., Neef, E., Müller-Miny, H., Schultze, J. H. (Hg.) (1962\_B2): Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands. Band II. Bad Godesberg: Selbstverlag der Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung.
- Mengeling, H. (1986): Geol. Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erl. Blatt 3514 Vörden. Hannover: Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung.
- Meyer, C. (2013): Neue Forschungsergebnisse am Riessuevit. In: Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 164, 417-432
- Meynen, E., Schmithüsen, J., Gellert, J., Neef, E., Müller-Miny, H., Schultze, J. H. (Hg.) (1962\_B1): Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands. Band I. Bad Godesberg: Selbstverlag der Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung.
- Meynen, E., Schmithüsen, J., Gellert, J., Neef, E., Müller-Miny, H., Schultze, J. H. (Hg.) (1962\_B2): Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands. Band II. Bad Godesberg: Selbstverlag der Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung.
- Michler, G. (1994): Die naturräumlichen Einheiten auf Blatt 181 München. Bonn - Bad Godesberg: Selbstverlag der Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung.
- Moosbauer, G. & Wilbers-Rost, S. (2009): Kalkriese und die Varusschlacht. In: Varusschlacht im Osnabrücker Land GmbH - Museum und Park Kalkriese (Hg.): 2000 Jahre Varusschlacht Konflikt. Stuttgart: Konrad Theiss Verlag.
- Moskowitz, B. M. (1981): Methods for estimating Curie temperatures of titanomagnetites from experimental JS-T data. In: Earth and Planetary Science Letters, 53, 84-88
- Mueller, K. (2000): Böden des Osnabrücker Berglandes. In: Mueller, K., Meuser, H., Huischen, L., Gromes, R.: Böden der Geest-, Moor- und Berglandschaft sowie anthropogene Böden im westlichen Niedersachsen. Exkursionsführer zum regionalprojekt Boden zur EXPO 2000 Hannover. Osnabrück: Eigenverlag der Fachhochschule Osnabrück.
- Mueller, K. & Nagel, E. (2012): Phosphatuntersuchungen in Knochengruben auf dem Oberesch. In: Rost, A. & Wilbers-Rost, S.: Kalkriese 6. Die Verteilung der Kleinfunde auf dem Oberesch in Kalkriese. Frankfurt a. M.: Philipp von Zabern.
- Mueller, K. (2013): Plaggenesch an der Lechtinger Mühle Standort 1. Profilbeschreibung. Persönlich überreichtes Manuskript.

- Mueller, K. & Makowsky, L. (2013): Exkursion zum Boden des Jahres 2013: Plaggenesche und ihre Bedeutung für die Archäologie. Exkursionsführer. Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur der Hochschule Osnabrück.
- Mühr, B. (2007): Klimadiagramme von Osnabrück, Rahden-Varl und Weißenburg.  
<http://www.klimadiagramme.de/Deutschland/deutschland2.html> (16.11.2016)
- Müller-Wille, W., (1938): Der Feldebau in Westfalen im 19. Jahrhundert. In: Westfälische Forschungen, 1, 51-86. [Zitiert und Umgezeichnet von Behre 2008]
- Mullins, C. E. (1977): Magnetic susceptibility of the soil and his significance in soil science – a review. In: Journal of Soil Science, 28, 223-246
- Munsell soil color charts (2000): X-Rite Munsell. Grand rapids, Minnesota USA
- Needham, S. & Macklin, M. G. (Ed.) (1992): Alluvial Archaeology in Britain. Oxford: Oxbow Books
- Neubauer, W. (2001): Magnetische Prospektion in der Archäologie. Wien: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften.
- Nichols, G. (2009): Sedimentology and Stratigraphy. Chichester: Wiley-Blackwell, 2nd ed.
- Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (2016): Plaggeneschstandort an der Lechtinger Mühle.  
[http://cms2.niedersachsen.de/boden/schutz/bodenbewusstsein/plaggeneschstandort-an-der-lechtinger-windmuehle-122975.html?\\_psmand=10](http://cms2.niedersachsen.de/boden/schutz/bodenbewusstsein/plaggeneschstandort-an-der-lechtinger-windmuehle-122975.html?_psmand=10) (01.12.2016)
- Niemeier, G. (1962): 58 Dümmer-Geestniederung. In: Meynen, E., Schmithüsen, J., Gellert, J., Neef, E., Müller-Miny, H., Schultze, J. H. (Hg.) (1962\_B2): Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands. Band II. Bad Godesberg: Selbstverlag der Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung.
- Otremba, E. (1962): 08 Fränkische Alb und 11 Fränkisches Keuper-Lias-Land. In: Meynen, E., Schmithüsen, J., Gellert, J., Neef, E., Müller-Miny, H., Schultze, J. H. (Hg.) (1962\_B1): Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands. Band I. Bad Godesberg: Selbstverlag der Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung.
- Özdemir, Ö. & Banerjee, S. K. (1982): A preliminary magnetic study of soil samples from west-central Minnesota. In: Earth and Planetary Science Letters, 59, 393-403
- Özdemir, Ö., & Dunlop, D. J. (1993): Magnetic domain structures on a natural single crystal of magnetite. In: Geophysical Research Letters, 20, 1835-1838

- Pallasser, R., Minasny, B., McBratney, A. B. (2013): Soil carbon determination by thermogravimetrics. In: PeerJ 1:e6; DOI 10.7717/peerj.6
- Parry, L. G. (1980): Shape-related factors in the magnetization of immobilized magnetite particles. In: Physics of Earth and Planetary Interiors, 22, 144-154
- Parry, L. G. (1982): Magnetization of immobilized particle dispersions with two distinct particle sizes. In: Physics of Earth and Planetary Interiors, 28, 230-241
- Pauthenet, R. (1958): Spontaneous Magnetisation of Some Garnet Ferrites and the Aluminium Substituted Garnet Ferrites. In: Journal of Applied Physics, 29, 253-255
- Peters, C. & Dekkers, M. J. (2003): Selected room temperature magnetic parameters as a function of mineralogy, concentration and grain size. In: Physics and Chemistry of the Earth, 28, 659-667
- Petrovsky, E., Kapicka, A., Jordanova, N., Knab, M., Hoffmann, V. (2000): Low-field magnetic susceptibility: A proxy method of estimating increased pollution of different environmental systems. In: Environmental Geology, 39, 312-318
- Pohl, J. (1974): Magnetisierung der Bohrkerne der Forschungsbohrung Nördlingen 1973. In: Geologica Bavarica, 72, 65-74
- Preuss, H., Vinken, R., Voss, H.-H. (2002): Symbolschlüssel Geologie - digital -. Hannover: Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- Quijano, L., Chaparro, M. A. E., Marié, D. C., Gaspar, L., Navas, A. (2014): Relevant magnetic and soil parameters as potential indicators of soil conservation status of Mediterranean agroecosystems. Geophysical Journal International, 198, 1805-1817
- Roberts, A. P. (1995): Magnetic properties of sedimentary greigite (Fe<sub>3</sub>S<sub>4</sub>). In: Earth and Planetary Science Letters, 134, 227-236
- Roberts, A. P., Wilson, G. S., Florindo, F., Sagnotti, L., Verosub, K. L., Harwood, D. M. (1998): Magnetostratigraphy of lower Miocene strata from the CRP-1 core, McMurdo Sound, Ross Sea, Antarctica. In: Terra Antarctica, 5, 703-713
- Roberts, A. P., Chang, L., Rowan, C. J., Horng, C.-S., Florindo, F. (2011): Magnetic properties of sedimentary greigite (Fe<sub>3</sub>S<sub>4</sub>): an update. In: Reviews of Geophysics, 49, RG1002/2010 1-46
- Rost, A. & Wilbers-Rost, S. (2012): Kalkriese 6. Die Verteilung der Kleinfunde auf dem Oberesch in Kalkriese. Darmstadt/Mainz: Verlag Philipp von Zabern.

- Rowan, C. J. & Roberts, A. P. (2006): Magnetite dissolution, diachronous greigite formation, and secondary magnetizations from pyrite oxidation: unravelling complex magnetizations in Neogene marine sediments from New Zealand. *Earth and Planetary Science Letters*, 241, 119-137
- Rowan, C. J., Roberts, A. P., Broadbent, T. (2009): Reductive diagenesis, magnetite dissolution, greigite growth and paleomagnetic smoothing in marine sediments: A new view. In: *Earth and Planetary Science Letters*, 277, 223-235
- Santos-Carballal, D., Roldan, A., de Leeuw, N. H. (2016): Early Oxidation Processes on the Greigite Fe<sub>3</sub>S<sub>4</sub> (001) Surface by Water: A Density Functional theory Study. In: *The Journal of Physical Chemistry*, 120, 8616-8629
- Scharlau, B., Nordmeier, V., Schlichting, H. J. (2003) Magnetische Levitation. In: Deutsche Physikalische Gesellschaft (Hrsg.): *Didaktik der Physik*. Berlin: Lehmanns. [https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/fachbereich\\_physik/didaktik\\_physik/publikationen/magnetische\\_levitation.pdf](https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/fachbereich_physik/didaktik_physik/publikationen/magnetische_levitation.pdf) (14.09.2016)
- Schäfer, W., Gehrt, E., Müller, U., Blankenburg, J., Gröger, J. (2010): Sulfatsaure Böden in niedersächsischen Küstengebieten. Hannover: (LBEG Hg.) *Geofakten* 24
- Scheffer, F./Schachtschabel, P. (2002): *Lehrbuch der Bodenkunde/Scheffer/Schachtschabel*. Heidelberg: Spektrum, 15. Aufl. neubearb. und erw. von Blume H.-P., Brümmer, G. W., Schwertmann, U., Horn, R., Kögel-Knabner, I., Stahr, K., Auerswald, K., Beyer, L., Hartmann, A., Litz, N., Scheinost, A., Stanjek, H., Welp, G., Wilke, B.-M.
- Scheinost, A. C. & Schwertmann, U. (1999): Color identification of iron oxides and hydroxysulfates – use and limitations. In: *Soil Science Society of America Journal* 63, 1463-1471
- Schmincke, H.-U. (2010): *Vulkanismus*. 3. Aufl. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Schnepp, E. (2011): Archäo-, Paläo- und Umweltmagnetik. In: Bork, H.-R., Meller, H., Gerlach, R. (Hg.): *Umweltarchäologie – Naturkatastrophen und Umweltwandel im archäologischen Befund: 3. Mitteldeutscher Archäologentag vom 07. bis 09. Oktober 2010*. Halle (Saale): Landesamt f. Denkmalpflege u. Archäologie Sachsen-Anhalt.
- Scholger, R (1998): Heavy metall pollution monitoring by magnetic suszeptibility measurements applied to sediments of the river Mur (Styria, Austria). *European Journal of Environmental Engineering and Geophysics*, 3, 25-37
- Scollar, I. (1965): A contribution to magnetic prospecting in archaeology. In: *Archaeo-Physika*, Köln Graz: Böhlau Verlag.

- Siever, R. (1989): Sand: ein Archiv der Erdgeschichte. Heidelberg: Spektrum-der-Wiss.-Verlagsgesellschaft.
- Siewert, C. (2004): Rapid screening of Soil Properties using Thermogravimetry. In: Soil Science Society of America Journal 68, 1656-1661
- Schmidt-Kaler, H. (1976): Geolog. Karte von Bayern 1 : 25 000. Erl. Blatt 7031 Treuchtlingen. München: Bayerisches Geologisches Landesamt.
- Schmitt, F. - J. (2015):Glossar: Magnetismus A-Z. [https : // www. supermagnete.com/magnetismus](https://www.supermagnete.com/magnetismus) (12.09.2016)
- Snowball, I. & Thompson (1990): A stable chemical remanence in Holocene sediments. In: Journal of Geophysical Research, 95 (B4), 4471-4479
- Snowball, I. (1997): Gyroremanent magnetization and the magnetic properties of greigite-bearing clays in southern Sweden. In: Geophysical Journal International, 129, 624-636
- Snowball, I. & Torii, M. (1999): Incidence and significance of magnetic iron sulphides in Quaternary sediments and soils. In: Maher, B. A. & Thompson, R. (Ed.) Quaternary Climates, Environments and Magnetism. Cambridge University Press.
- Soffel, H. (1991): Paläomagnetismus und Archäomagnetismus. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Soffel, H. (2002): Titanomagnetit und Titanomaghemit. In: Lexikon der Geowissenschaften. Bd. 5. Heidelberg/Berlin: Spektrum Akademischer Verlag GmbH.
- SRTM 1 (Shuttle Radar Topography Mission) (2011): Szene: SRTM1N48E011V3, Aufnahmedatum 11. Februar 2011 (United States Geological Survey: Earth Explorer. <http://earthexplorer.usgs.gov/> (29.09.2016))
- Ssymank, A. (1994): Neue Anforderungen im europäischen Naturschutz: Das Schutzgebietssystem Natura 2000 und die FFH-Richtlinie der EU. In: Natur und Landschaft, 69 (9), 395-406
- Staatsarchiv Osnabrück (1994): Die Landesvermessung des Fürstbistums Osnabrück 1784 – 1790, Karte 8b Kalkrieser Mark, Nordesch, Rotenburg.
- Stanjek, H., Fassbinder, J. W. E., Vali, H., Wägele, H., Graf, W. (1994): Evidence of biogenic greigite (ferrimagnetic Fe<sub>3</sub>S<sub>4</sub>) in soil. In: European Journal of Soil Science, 45, 97-103
- Stele, A. & Bussmann, J. (2013): Bericht zur fernerkundlich-magnetischen Prospektion an der Fossa Carolina (Karlsgraben). Unveröffentlichter Bericht.



Nordöstliche und südwestliche Bereiche des Ortsteils Graben, Landkreis Weißenburg-Gunzenhausen im Regierungsbezirk Mittelfranken.

Stephenson, A. (1970): Single domain grain distributions. A method for the determination of single domain grain distribution. *Physics of the Earth and Planetary Interior*, 4, 353-360

Sussexarch (2015): Snuffler - Freeware Geophysics Software.  
<http://www.sussexarch.org.uk/geophys/snuffler.html> (29.09.2015)

Tauxe, L., Mullender, T. A. T., Pick, T. (1996): Potbellies, wasp-waists, and superparamagnetism in magnetic hysteresis. In: *Journal of geophysical research*, 101, 571-583

Tauxe, L., Bertram, H. N., Seberino, C. (2002): Physical interpretation of hysteresis loops: Micromagnetic modeling of fine particle magnetite. In: *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 3 (10), 1055, doi:10.1029/2001GC000241

Tauxe, L., Banerjee, S. K., Butler, R. F., van der Voo, R. (2016): *Essentials of Paleomagnetism*, 4th Web Edition. <https://earthref.org/MagIC/books/Tauxe/Essentials/#QQ2-8-110> (07.09.2016)

Thompson, R., Bloemendal, J., Dearing, J. A., Oldfield, F., Rummery, T. A., Stober, J. C., Turner, G. M. (1980): Environmental applications of magnetic measurements. In: *Science*, 207, 481-486

Thompson, R. & Oldfield, F. (1986): *Environmental Magnetism*. London: Allen & Unwin.

Till, J. L., Guyodo, Y., Lagroix, F., Morin, G., Ona-Nguema, G. (2015): Goethite as a potential source of magnetic nanoparticles in sediments. In: *Geology*, 43 (1), 75-78

Tolksdorf-Lienemann, E. (2007): *Bodenkunde und Untersuchungen zu bodenlagernden Knochen am Oberesch*. In: Wilbers-Rost, S. U. A.: *Kalkriese 3. Interdisziplinäre Untersuchungen auf dem Oberesch in Kalkriese*. Mainz: Verlag Philipp von Zabern.

Tucker, M. (1996): *Methoden der Sedimentologie*. Stuttgart: Enke.

USGS (United States Geological Survey) (2016): *Earth Explorer*. <http://earthexplorer.usgs.gov/> (29.09.2016)

Verosub, K. L. & Roberts, A. P. (1995): Environmental magnetism: Past, present, and future. In: *Journal of Geophysical Research*, 100, 2175-2192

Vincenz, S. A. (1965): Frequency dependence of magnetic susceptibility of rocks in weak alternating fields. *Journal of Geophysical Research*, 70 (6), 1371-1377

- ViOLMuPK (Varusschlacht im Osnabrücker Land Museum und Park Kalkriese) (2016): Archäologie in Kalkriese. <http://www.kalkriese-varusschlacht.de/varusschlacht/archaeologie/> (14.11.2016)
- Vogt, J. V., Soille, P., Jager, A. de., Rimaviciute, E., Mehl, W., Haastrup, P., Paraccini, M. L., Dusart, J., Bodis, K., Foisneau, S., Bamps, C. (2007): Developing a pan-European Data Base of Drainage Networks and Catchment Boundaries from a 100 Metre DEM. Proceedings AGILE International Conference.
- Walford, J. (2013): Archaeological geophysical survey of land to the north-west of Collingtree, Northampton. Northamptonshire Archaeology, Report 13/35
- Wasilewski, P. J. (1973): Magnetic Hysteresis in natural materials. In: Earth and Planetary Science Letters, 20, 67-72
- Werther, L. (2013): Grabenverlauf als Vektordatei im .shp-Format.
- Weston, D. G. (2001): Alluvium and Geophysical Prospection. Archaeological Prospection, 8, 265-272
- Wilbers-Rost, S., Uerpmann, H.-P., Uerpmann, M., Grosskopf, B., Tolksdorf-Linemann, E. (2007): Kalkriese 3 Interdisziplinäre Untersuchungen auf dem Oberesch in Kalkriese. Mainz a. R.: Verlag Philipp von Zabern.
- Wilkin, R. T. & Barnes, H. L. (1996): Pyrite by reactions of iron monosulfides with dissolved inorganic sulfur species. Geochimica et Cosmochimica Acta, 60, 4167-4179
- WMSGBD-NI (Web Mapping Service Geobasisdaten Niedersachsen) (2016): [http://www.umweltkarten-niedersachsen.de/arcgis/services/Basisdaten\\_wms/MapServer/WMS/Server?](http://www.umweltkarten-niedersachsen.de/arcgis/services/Basisdaten_wms/MapServer/WMS/Server?) (Letzter Zugriff auf Server: 11.11.2016)
- Wörner, G & Schmincke, H.-U. (1984): Mineralogical and chemical zonation of the Laacher See tephra (East Eifel, Germany). In: Journal of Petrology, 25, 836-851
- Yu, Y., Dunlop, L., Pavlish, L., Cooper, M. (2000): Archeomagnetism of Ontario potsherds from the last 2000 year. Journal of Geophysical research, 105, 19419-19433
- Zickgraf, B. (1999): Geomagnetische und geoelektrische Prospektion in der Archäologie. Rahden/Westf.: Verlag Marie Leidorf GmbH.
- Zielhofer, C. & Kirchner, A. (2014): Naturräumliche Gunstlage der Fossa Carolina. In: Ettl, P., Daim, F., Berg-Hobohm, S., Werther, L., Zielhofer, C. (Hg.) (2014): Großbaustelle 793 Das Kanalprojekt Karls des Großen zwischen Rhein und Donau. Mainz: Verlag des Römisch-Germanischen Zentralmuseums.

Zielhofer, C. & Leitholdt, E. (2014): Zum Bauplan der Fossa Carolina. Die Verschiebung der Wasserscheide als wasserbauliches Konzept. In: Ettl, P., Daim, F., Berg-Hobohm, S., Werther, L., Zielhofer, C. (Hg.) (2014): Großbaustelle 793 Das Kanalprojekt Karls des Großen zwischen Rhein und Donau. Mainz: Verlag des Römisch-Germanischen Zentralmuseums.

Zielhofer, C., Leitholdt, E., Werther, L., Stele, A., Bussmann, J., Linzen, S., Schneider, M., Meyer, C., Berg-Hobohm, S., Ettl, P. (2014): Charlemagne's Summit Canal: An Early Medieval Hydro-Engineering Project for Passing the Central European Watershed. In: PLOS ONE, 9 (9). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0108194> (15.11.2016)

Zucker, A., Helger, H., Zech, W. (1986): Schwefelformen saurer Böden unter Nadelwald in Nordostbayern. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 149, 110-119

## Anhang

### Inhalt des Anhangs

Anhang A: Frequenzabhängiges Verhalten unterschiedlich großer magnetischer Partikel. ....	118
Anhang B: Fotos und Schaltplan des VFTB. ....	119
Anhang C: Day-Plot aus unterschiedlichen Hysteresen. ....	120
Anhang D: Kontrastverbesserung der Magnetogramme vom Oberesch. ....	121
Anhang E: Geologie des Oberesch und seiner Umgebung. ....	122

Auf dem beigefügten Datenträger befinden sich:

- Daten aus der Laboranalytik
- Rohdaten aus VFTB-Messungen
- die vorliegende Arbeit als pdf-Datei

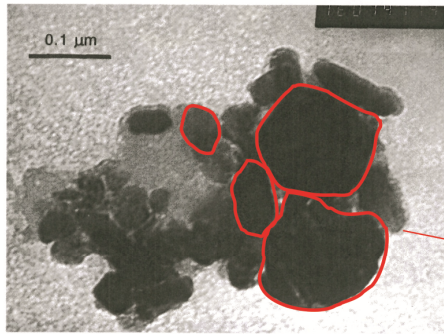


Plate 1.14. Transmission electron micrograph of ultrafine magnetic grains of variable grain size from palaeosol S, from the Chinese Loess Plateau (Photo: B. Maher).

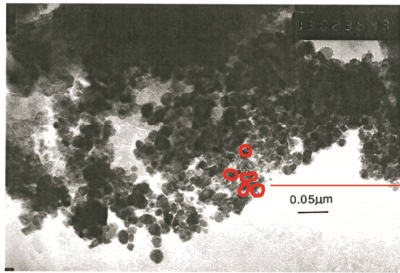
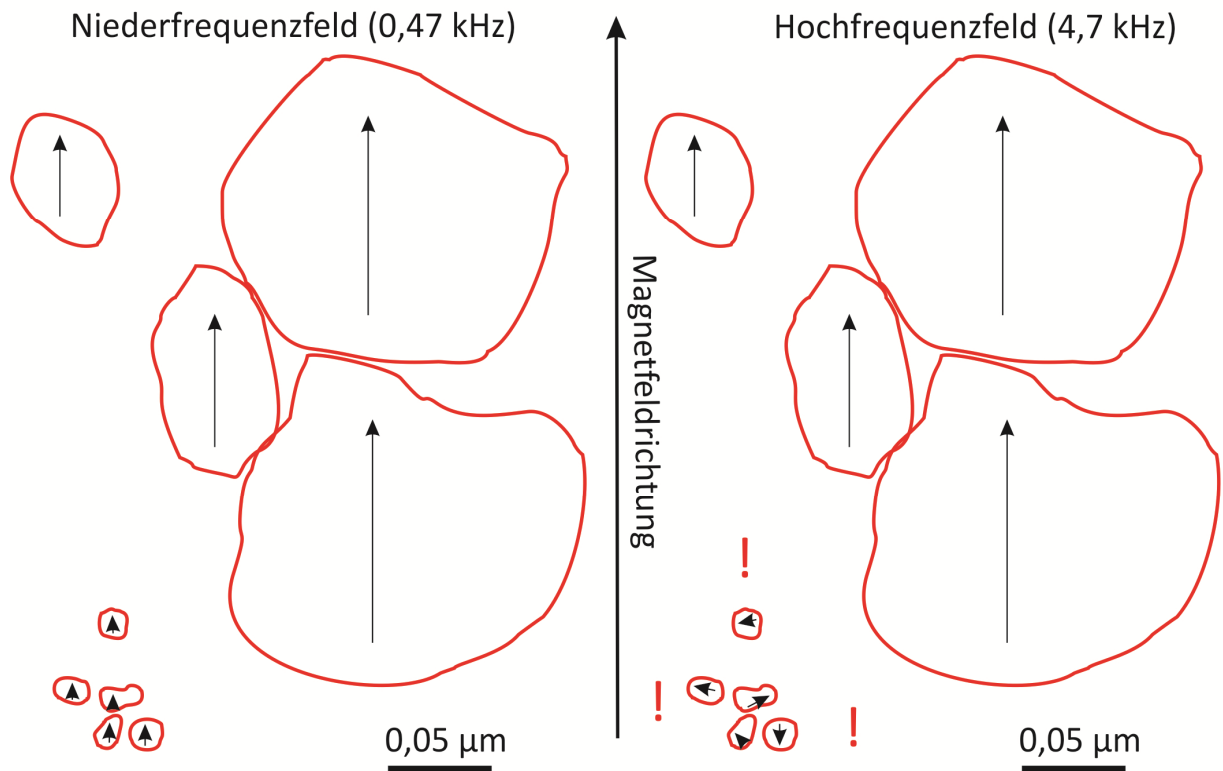
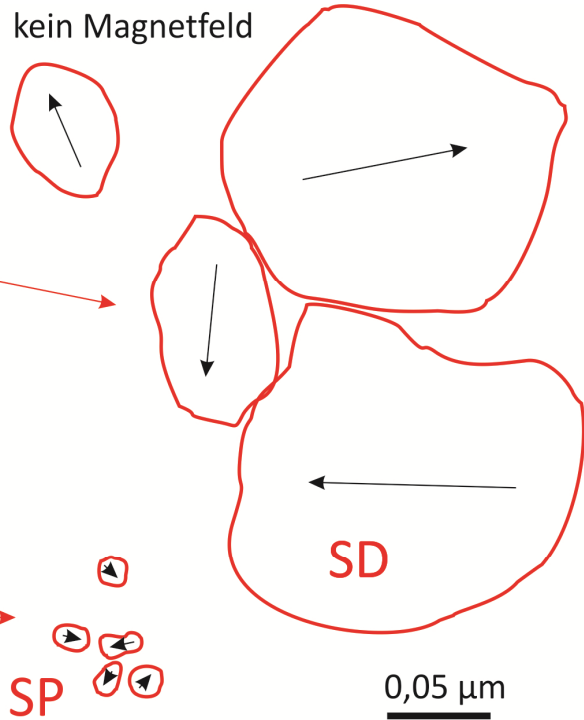
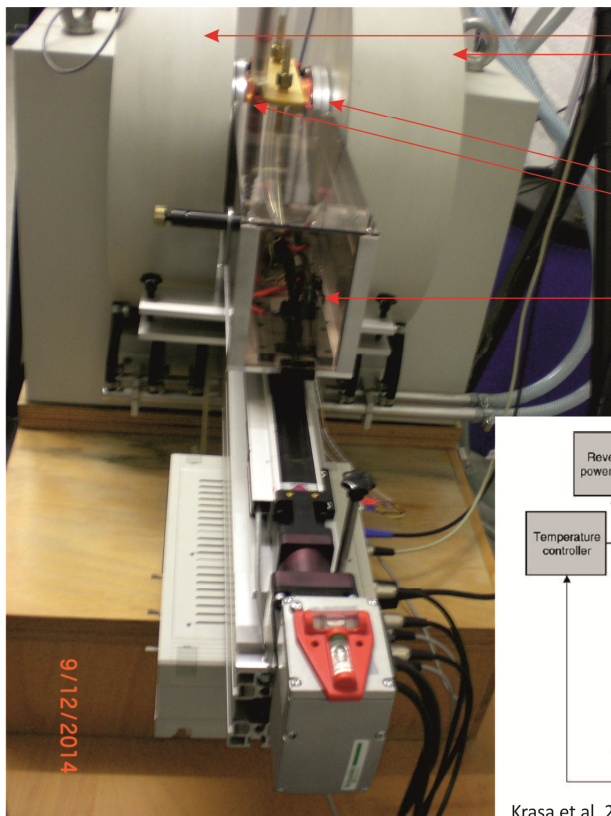


Plate 1.15. Transmission electron micrograph of clusters of ultrafine magnetic grains from a modern soil profile (a cambisol/brown earth), Exmoor, UK (Photo: B. Maher).

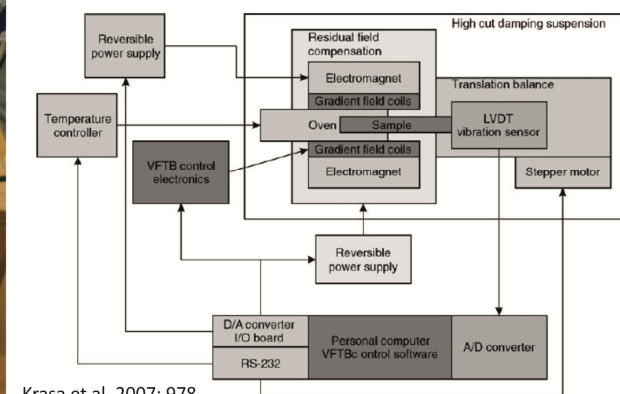
Maher et al. 1999: 17



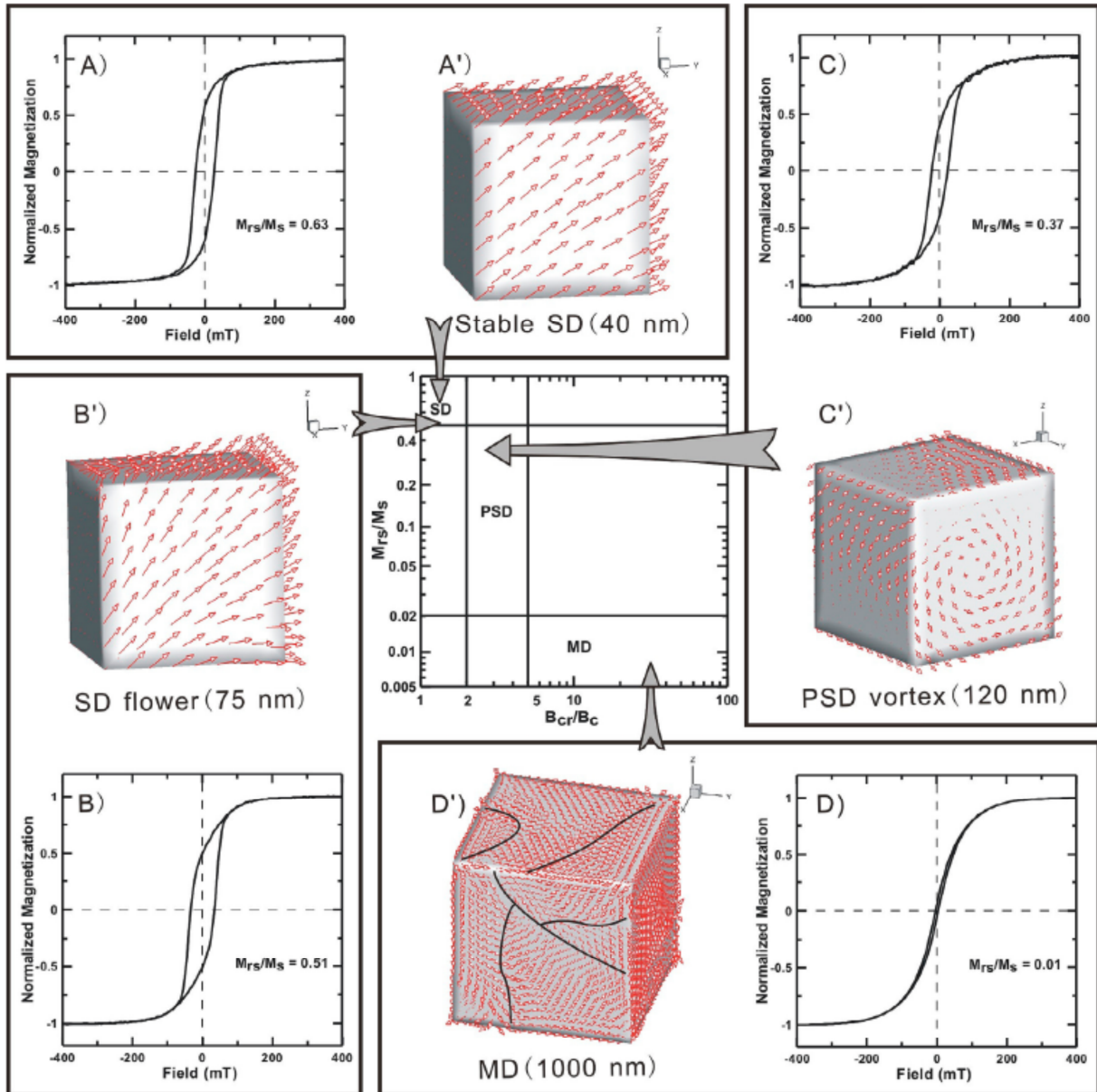
Anhang A: Frequenzabhängiges Verhalten unterschiedlich großer magnetischer Partikel.



- ← Elektromagnete mit Kompensationsspulen
- ← Gradientfeld-Spulen
- ← Differentialtransformer (LVDT) mit Probenhalter



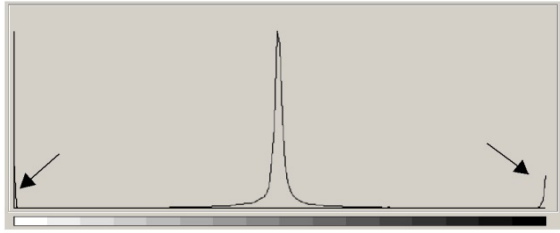
Anhang B: VFTB der Sektion Geophysik am Department für Geo- und Umweltwissenschaften der Ludwigs-Maximilians-Universität München. (Oben) Vorderansicht des gesamten Systems. (Unten links) sichtbare Komponenten im Bereich des Probenhalters. (Unten rechts) einfaches Schaltschema des VFTB.



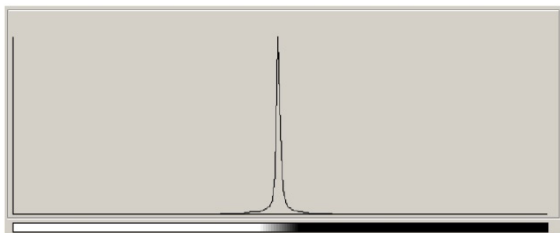
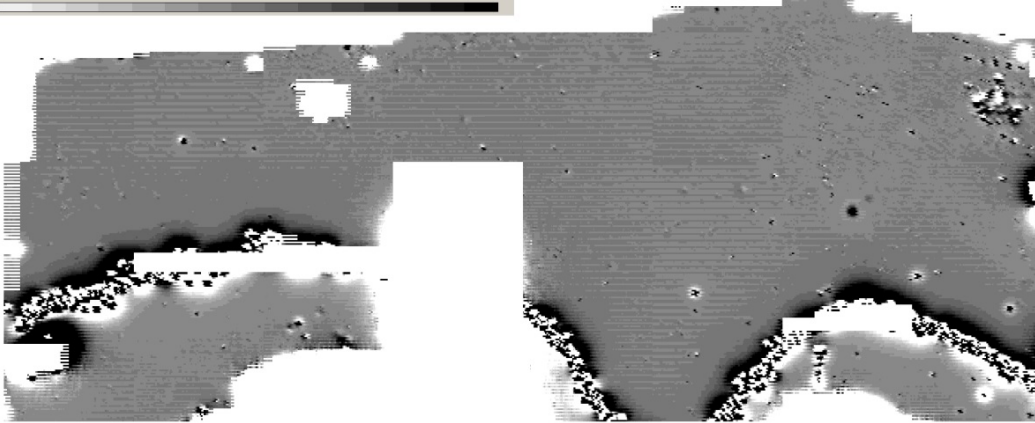
**Figure 1.** (a–d) Hysteresis loops and associated theoretical micromagnetic states for a uniaxial magnetic cube with different sizes. With increasing grain size, spin structures evolve from uniaxial (Figure 1a) to flower (Figure 1b), to vortex (Figure 1c), and to multidomain states (Figure 1d). The central subfigure is a plot of grain size–dependent ratios of hysteresis parameters [Day *et al.*, 1977] with data ranges for  $M_{rs}/M_s$  versus  $B_{cr}/B_c$  (usually named the Day plot) that divides the region into SD, PSD, and MD fields. For a more detailed explanation of the Day plot, readers are referred to Dunlop [2002a, 2002b].

Anhang C: Day-Plot (in der Mitte) und die Lage der Hysterese-Ratios aus unterschiedlichem Domänenverhalten innerhalb des Day-Plots. Weitere Informationen sind dem Abbildungsuntertitel zu entnehmen (Abbildung aus Liu *et al.* (2012: 3)).

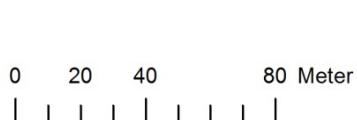
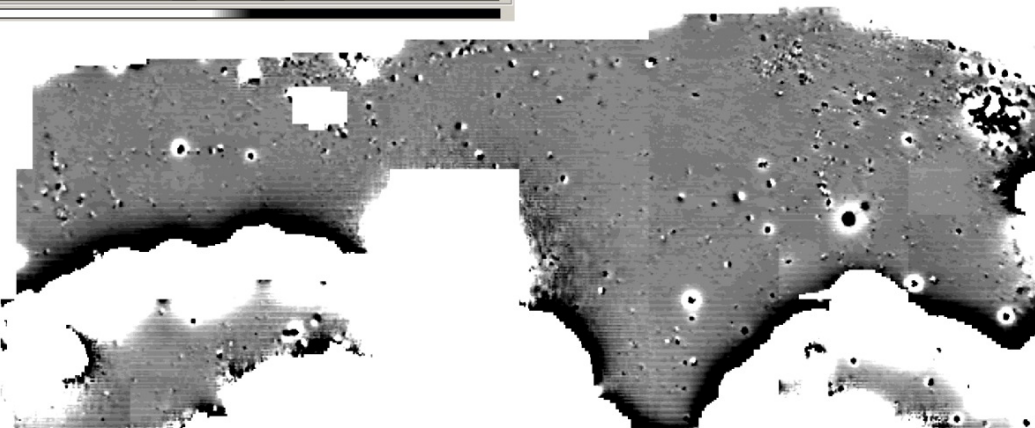
Anhang



Unbereinigte Rohdaten: massive Eisenobjekte am Oberesch erzeugen "magnetische Schatten"=> die Daten sind nicht normalverteilt.



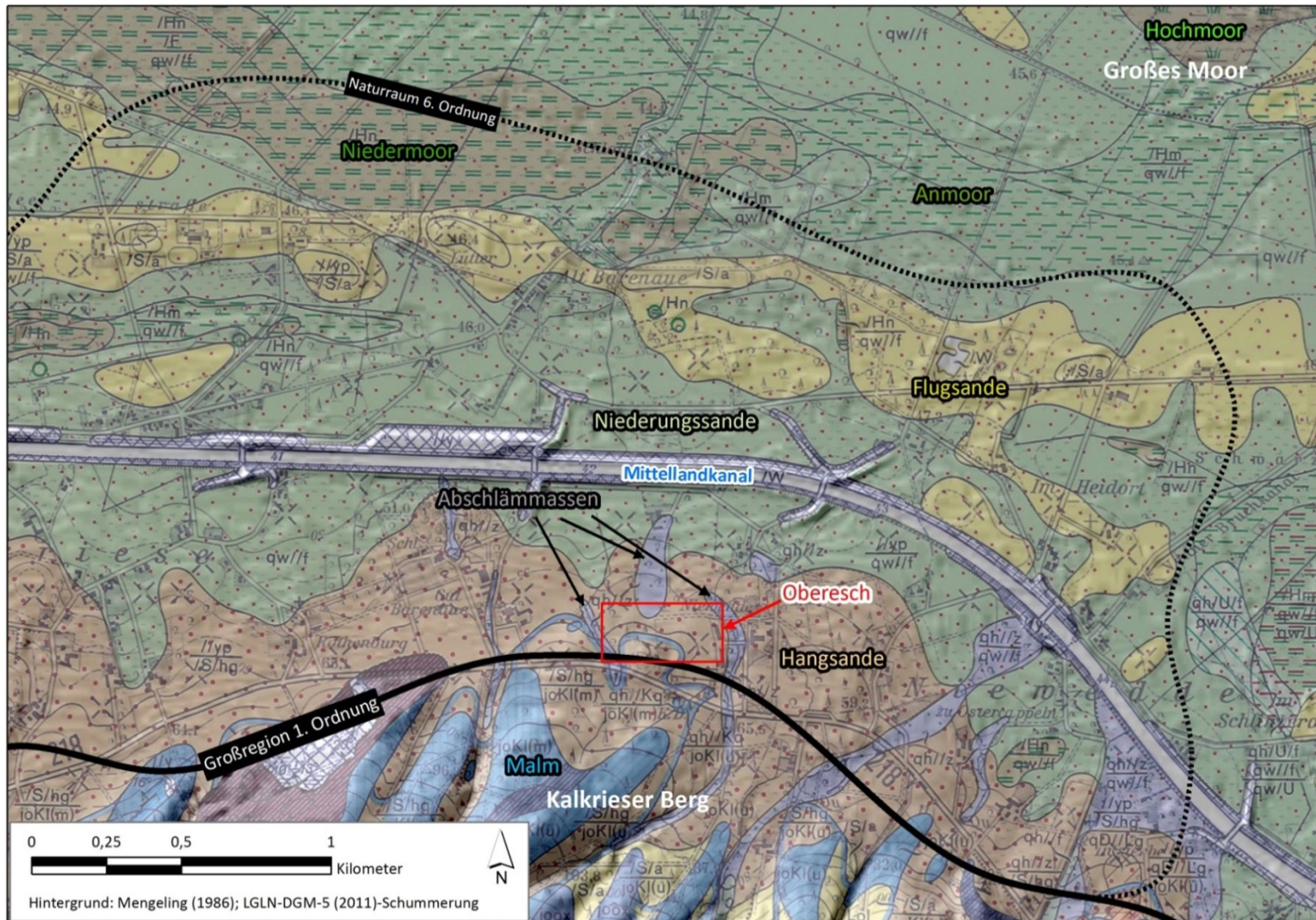
Datenbereinigung: das Entfernen "magnetischer Schatten" bedingt eine Annäherung an die Normalverteilung und dient einer deutlichen Kontrastverbesserung des Magnetogramms



Stand: 17.06.14

Anhang D: (Oben) Magnetogramm A-D vom Oberesch mit unbereinigten Rohdaten und mit (unten) bereinigten Rohdaten.





Anhang E: Geologische Umgebung des Oberesch mit vereinfachten geologischen Einheiten (Georeferenzierte Geologische Karte 1: 25000 aus Mengeling (1986)).

## **Erklärung über die Eigenständigkeit der erbrachten wissenschaftlichen Leistung**

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Weitere Personen waren an der inhaltlichen materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder andere Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

---

(Ort, Datum)

---

(Unterschrift)