
Magnetometrische Untersuchungen an spätkeltischen Viereckschanzen in Bayern

Karin Berghausen

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades
an der Fakultät für Geowissenschaften
der Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von
Karin Berghausen
aus München

München, 2013

Erstgutachter: Prof. Dr. Heinrich Chr. Soffel
Zweitgutachter: PD Dr. Jörg W. E. Faßbinder

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Dezember 2013

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	iii
Verzeichnis der Abbildungen	vii
Verzeichnis der Tabellen	x
Kapitel 1. Einleitung	1
1.1. Fragestellung der Arbeit.....	1
1.2. Methodische Durchführung	1
1.3. Überblick über die folgenden Kapitel	2
Kapitel 2. Grundlagen und Forschungsstand.....	3
2.1. Archäologie: Viereckschanzen.....	3
2.1.1. Kurzbeschreibung der Anlagenformen	3
2.1.2. Verbreitung	3
2.1.3. Datierung und Klassifizierung als Viereckschanzen	4
2.1.4. Archäologische Forschungsgeschichte	4
2.1.5. Erfassung verebener Anlagen durch Luftbildarchäologie	5
2.1.6. Detailerfassung mittels Magnetometerprospektion	5
2.1.7. Satellitenbildaufnahmen	6
2.1.8. Digitale Geländemodelle	6
2.2. Bodenkundliche Aspekte	7
2.2.1. Einführende Literatur	7
2.2.2. Geologische Ausgangssituation, Verwitterung und Bodenbildung	7
2.2.3. Böden im Untersuchungsgebiet	8
2.2.4. Geländesituationen	9
2.2.5. Wassernähe, Wasserzuläufe zum Graben	10
2.2.6. Eisen bei der Bodenbildung	11
2.3. Feld- und gesteinsmagnetische Untersuchungen	12
2.3.1. Prinzipielle Betrachtungen / Überblick	12
2.3.2. Grundlagen des Gesteinsmagnetismus	13
2.3.2.1. Einführung	13
2.3.2.2. Arten des Magnetismus in Materie	13
2.3.2.3. Domänenstruktur	15
2.3.2.4. Induzierte und remanente Magnetisierung	15
2.3.2.5. Wichtige Eisenminerale und ihre Eigenschaften	17
2.3.3. Anwendungen des Gesteinsmagnetismus auf Bodenuntersuchungen	19
2.3.3.1. Anreicherung ferro(i)magnetischer Minerale	19
2.3.3.2. Lössabfolgen, Seesedimente und marine Sedimente	20
2.3.3.3. Zusammenhang von Bodenverschmutzung und magnetischen Mineralen	21
2.3.3.4. Untersuchungsmethoden	21

Kapitel 3. Ergebnisse der Magnetometerprospektionen im Hinblick auf magnetische Anomalientypen	22
3.1. Auswahl und Lage der Untersuchungsflächen	22
3.2. Magnetometrische Nachweisbarkeit der Gräben von Viereckschanzen	23
3.2.1. Überblick: Unterschiedliche magnetische Anomalien der Viereckschanzengräben	23
3.2.2. Grabenanomalie Typ A: Deutlich erkennbare positive Anomalie	24
3.2.3. Grabenanomalie Typ B: Schwach erkennbare positive Anomalie	26
3.2.4. Grabenanomalie Typ C: Wechsel zwischen deutlich und schwach erkennbarer positiver Anomalie	26
3.2.5. Grabenanomalie Typ D: Wechsel zwischen positiver und negativer Anomalie	26
3.2.6. Grabenanomalie Typ E: Deutlich erkennbare negative Anomalie	27
3.2.7. Grabenanomalie Typ F: Schwach erkennbare negative Anomalie	27
3.2.8. Grabenanomalie Typ G: Keine Anomalie erkennbar	27
3.2.9. Grabenanomalie Typ H: Keine Aussage über Grabenanomalie möglich	28
3.2.10. Korrelation der Grabenanomalien mit Bodentypen	28
3.3. Magnetometrische Nachweisbarkeit der Innenbebauung von Viereckschanzen	29
3.3.1. Überblick: Korrelation der Nachweisbarkeit von Bebauung mit Nachweisbarkeit von Gräben, Bodentypen und Erhaltungszustand	29
3.3.2. Nachweisbarkeit von Bebauung und Gräben	30
3.3.3. Nachweisbarkeit von Bebauung und Bodentypen	30
3.3.4. Nachweisbarkeit von Bebauung und Erhaltungszustand	30
3.3.5. Erosion	31
3.3.6. Brandsituationen	31
Kapitel 4. Ergebnisse der Magnetometerprospektionen und archäologische Interpretation	33
4.1. Größen und Eckwinkel der Viereckschanzen	33
4.2. Bebauungssituation der Viereckschanzen	34
4.3. Einzelbetrachtungen	35
Kapitel 5. Gelände- und Labormessungen – Papferding	36
5.1. Lage und Geschichte der Viereckschanze	36
5.1.1. Lage, Geologie und Boden	36
5.1.2. Historische Entwicklung	37
5.2. Magnetometerprospektion	37
5.3. Grabung	39
5.3.1. Überblick	39
5.3.2. Schichtfolgen in Profil 2	40
5.4. Suszeptibilitätsmessungen am Grabungsprofil 2	43
5.4.1. Suszeptibilitätsmessungen am Grabungsprofil 2 im Wallbereich	43
5.4.2. Suszeptibilitätsmessungen am Grabungsprofil 2 im Grabenbereich	45
5.5. Probennahme und Laboruntersuchungen	47
5.5.1. Probennahme	47
5.5.2. Untersuchungsstrategie	48

5.5.3. Suszeptibilität, NRM und IRM	48
5.5.3.1. Bereich des ehemaligen Walles	49
5.5.3.2. Bereich des ehemaligen Grabens	50
5.5.3.3. Interpretierender Vergleich von Graben- und Wallbereich	52
5.5.4. Messungen an der VFTB	53
5.5.4.1. Qualität und Aussagekraft der Messergebnisse	53
5.5.4.2. Typische Ergebniskurven der VFTB-Messungen	54
5.5.4.3. Ergebnisse der VFTB-Messungen für Wall- und Grabenbereich	59
5.5.4.4. Mögliche chemische Mineraländerungen während der thermischen Untersuchungen	60
5.5.4.5. Interpretation	61
Kapitel 6. Gelände- und Labormessungen – Fehmbach	63
6.1. Überblick über örtliche Gegebenheiten und die beiden Prospektionen	63
6.2. Magnetometerprospektionen	65
6.2.1. Die erste Magnetometerprospektion: Über unverändertem Boden	65
6.2.2. Die zweite Magnetometerprospektion: Nach Abtragung des Oberbodens	65
6.2.3. Interpretation der Magnetometerprospektionen	67
6.3. Suszeptibilitätsmessungen an Grabenprofilen	68
6.3.1. Vorgehensweise	68
6.3.2. Profil G-H (Ostgraben)	68
6.3.3. Profil C-D (Südgraben)	70
6.3.4. Profil E-F (Südöstliche Grabenecke)	72
6.3.5. Interpretation der Suszeptibilitätsmessungen im Gelände	73
6.4. Laboruntersuchungen an Bodenproben	74
6.4.1. Beprobung	74
6.4.2. Suszeptibilitätsmessungen an Bodenproben	74
6.4.3. Messungen an der VFTB (Variable Field Translation Balance)	76
6.4.3.1. Probenmaterial und Vorgehensweise	76
6.4.3.2. IRM und Backfieldmessungen	77
6.4.3.3. Hysterese- und thermomagnetische Messungen	78
6.4.4. Interpretation der Laboruntersuchungen	80
6.5. Vergleich mit der Viereckschanze von Aubing / Mooschwaige	80
Kapitel 7. Gelände- und Labormessungen – Laibstadt	82
7.1. Geologie, Boden und Gelände	82
7.2. Archäologie	83
7.3. Magnetometerprospektion	83

7.4. Laboruntersuchungen an Bodenproben	87
7.4.1. Beprobung	87
7.4.2. Beschreibung der Bohrprofilschichten	89
7.4.3. Gesteinsmagnetische Messungen	91
7.4.3.1. Überblick über die durchgeführten Messungen	91
7.4.3.2. Suszeptibilität, IRM und Backfield	92
7.4.3.3. Hysteresekurven und thermische Untersuchungen	94
7.4.3.4. Interpretation der gesteinsmagnetischen Messungen	95
 Kapitel 8: Ergebnisse der magnetometrischen und bodenkundlichen Untersuchungen	 97
8.1. Korrelation von Grabenanomalien mit Bodentypen	97
8.2. Archäologische Befunde	97
8.3. Ergänzende Geländemessungen und Laboruntersuchungen	98
8.4. Ursachen fehlender bzw. negativer Grabenanomalien	98
8.4.1. Auflösung ferrimagnetischer Minerale im Grabenbereich	98
8.4.2. Verfüllung des Grabens mit diamagnetischem Gestein	99
8.5. Archäologische Interpretation	100
 Kapitel 9. Zusammenfassung	 101
 Literaturverzeichnis	 104
Physikalische Einheiten und Umrechnungen	115
 Anhang 1. Messverfahren, Messgeräte und Software	 116
A1.1. Magnetometerprospektionen	116
A1.2. Suszeptibilitätsmessungen im Gelände	116
A1.3. Labormessungen	117
A1.3.1. Verwendete Messgeräte	117
A1.3.2. Einzelheiten der Labormessungen an Proben aus Papferding	118
A1.3.3. Einzelheiten der Labormessungen an Proben aus Fehmbach	119
A1.3.4. Einzelheiten der Labormessungen an Proben aus Laibstadt	120
 Anhang 2. Messkurven	 121
A2.1. Thermomagnetische Kurven, Hysteres-, IRM- und Backfield- Kurven der Viereckschanze von Papferding	 121
A2.2. Hysteres- und thermomagnetische Kurven der Viereckschanze von Fehmbach ..	130
A2.3. Hysteres- und thermomagnetische Kurven der Viereckschanze von Laibstadt ...	134
 Anhang 3. Katalog der prospektierten Viereckschanzen	 144
 Danksagung	 201

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 2.1.	Symbolische Darstellung der magnetischen Momente der Atomelektronen bei verschiedenen Arten des Magnetismus.....	14
Abb. 2.2.	Magnetische Hysteresekurve.....	16
Abb. 2.3.	Angenäherte Farben der wichtigsten Bodeneisenoxide.	18
Abb. 3.1.	Ausschnitte aus den Grabenbereichen von Magnetogrammen der untersuchten Viereckschanzen, je 40x40 Meter.....	23
Abb. 3.2.	Häufigkeit der Anomalietyphen in absoluten Zahlen	24
Abb. 5.1.	Viereckschanze Papferding, digitale Ortskarte.....	36
Abb. 5.2.	Viereckschanze Papferding, BLfD Luftbild.....	36
Abb. 5.3.	Viereckschanze Papferding, Magnetometerprospektion.....	38
Abb. 5.4.	Viereckschanze Papferding, Interpretationsplan der Magnetometerprospektion.....	38
Abb. 5.5.	Viereckschanze Papferding, Anlage eines Grabungsschnittes durch Wall- und Grabenbereich.....	39
Abb. 5.6.	Viereckschanze Papferding, westliches Grabungsprofil 2, südlicher Teil: Bereich unter ehemaligem Wall.....	40
Abb. 5.7.	Viereckschanze Papferding, westliches Grabungsprofil 2, nördlicher Teil: Grabenbereich.....	40
Abb. 5.8.	Viereckschanze Papferding, Detailfotos von Profil 2.....	42
Abb. 5.9.	Viereckschanze Papferding: Messung der magnetischen Suszeptibilität an Profil 2.....	44
Abb. 5.10.	Viereckschanze Papferding, Messergebnisse der magnetischen Suszeptibilität an Profil 2.....	45
Abb. 5.11.	Viereckschanze Papferding, Profil 2, Grabenbereich. Situation unmittelbar vor der Messung der Suszeptibilität.....	46
Abb. 5.12.	Viereckschanze Papferding, Profil 2, rechte Grabenhälfte. Suszeptibilitätsmessungen.....	46
Abb. 5.13.	Viereckschanze Papferding, jeweils 2 schichttypische Proben aus Wallbereich. Ergebnisse der Laboruntersuchungen: Magnetische Suszeptibilität und NRM.....	49
Abb. 5.14.	Viereckschanze Papferding, senkrechtes Beprobungsprofil in Grabenmitte. Ergebnisse der Laboruntersuchungen: Magnetische Suszeptibilität, NRM und IRM.....	50
Abb. 5.15.	Viereckschanze Papferding, jeweils zwei typische Proben pro Schicht aus dem Grabenbereich. Ergebnisse der Laboruntersuchungen: Magnetische Suszeptibilität und NRM.....	51
Abb. 5.16.	Viereckschanze Papferding, beispielhaft vorgestelltes Ergebnis der VFTB-Messung an Probe P2-03-V1, Schicht 3	53
Abb. 5.17.	Viereckschanze Papferding, typische VFTB-Kurvenverläufe unter dem ehemaligen Wall der Viereckschanze.....	55

Abb. 5.18.	Viereckschanze Papferding, typische VFTB-Kurvenverläufe aus dem Grabenbereich der Viereckschanze.....	56
Abb. 5.19.	Viereckschanze Papferding, stufenweise Erhitzung und Abkühlung einer Probe, beispielhaft durchgeführt an Probe P2-19, Schicht 19.....	57
Abb. 6.1.	Viereckschanze Fehmbach, Luftbild aufgenommen während der Grabung der Osthälfte im Jahr 2000, Blick von Süden.....	63
Abb. 6.2.	Viereckschanze Fehmbach, Foto der Grabung im November 2008, von Süden aus gesehen.	64
Abb. 6.3.	Viereckschanze Fehmbach, Foto der Grabung im November 2008, von Nordosten aus gesehen.	64
Abb. 6.4.	Viereckschanze Fehmbach. Magnetogramm der ersten Prospektion im Mai sowie der zweiten Prospektion vom November	66
Abb. 6.5.	Viereckschanze Fehmbach. Interpretationsplan mit den Befunden der Grabungen und der Magnetik.....	67
Abb. 6.6.	Viereckschanze Fehmbach. Grafische Darstellung der Suszeptibilitätsmesswerte und Profilfoto am Grabungsschnitt G-H im Ostgraben.....	69
Abb. 6.7.	Viereckschanze Fehmbach, Grabungsschnitt C-D im Südgraben. Suszeptibilitätsmessung und Profilfoto.....	71
Abb. 6.8.	Viereckschanze Fehmbach, Grabungsschnitt E-F in der südwestlichen Grabenecke. Suszeptibilitätsmessung und Profilfoto.....	72
Abb. 6.9.	Viereckschanze Fehmbach, Ergebnisse der im Labor durchgeführten Suszeptibilitätsmessungen.....	75
Abb. 6.10.	Viereckschanze Fehmbach, Messungen an der Feinfraktion der Bodenproben: IRM und Backfield.....	77
Abb. 6.11.	Viereckschanze Fehmbach, typische Hysterese- und thermomagnetische Kurven.....	79
Abb. 7.1.	Viereckschanze Laibstadt, digitale Ortskarte	82
Abb. 7.2.	Viereckschanze Laibstadt, Luftbildaufnahme im Winter.....	83
Abb. 7.3.	Viereckschanze Laibstadt, Magnetogramm.	84
Abb. 7.4.	Viereckschanze Laibstadt, Interpretationsplan des Magnetogramms.....	85
Abb. 7.5.	Viereckschanze Laibstadt, Rekonstruktionsvorschlag basierend auf den Ergebnissen der Magnetometerprospektion	86
Abb. 7.6.	Viereckschanze Laibstadt, Entnahme von Bodenproben	87
Abb. 7.7.	Viereckschanze Laibstadt, Lagen der Beprobungspunkte in der Nordostecke der Prospektionsfläche	88
Abb. 7.8.	Viereckschanze Laibstadt, Lagen und Höhen der Beprobungspunkte relativ zueinander	88
Abb. 7.9.	Viereckschanze Laibstadt, Bohrkern aus Profil 2	88
Abb. 7.10.	Viereckschanze Laibstadt, Ergebnisse der Messungen von Suszeptibilität, IRM und Backfield.....	92
Abb. 7.11.	Viereckschanze Laibstadt, typische Kombinationen von Hysteresekurven mit thermischen Erhitzungs- und Abkühlkurven der Bodenproben.....	94

Abbildungen in Anhang 2:

Messkurven der Viereckschanzen

Papferding	121
Fehmbach	130
Laibstadt	134

Abbildungen in Anhang 3:

Je ein Luftbild, Magnetogramm und Interpretationsplan der Viereckschanzen

Nr. 1	Beuren, Lkr. Neu-Ulm	146
Nr. 2	Baisweil, Lkr. Ostallgäu	148
Nr. 3	Weiltingen, Lkr. Ansbach	150
Nr. 4	Eybburg, Lkr. Ansbach	152
Nr. 5	Laibstadt, Lkr. Roth	154
Nr. 6	Hechendorf-Güntering, Lkr. Starnberg	156
Nr. 7	Egweil, Lkr. Eichstätt	158
Nr. 8	Aubing / Mooschwaige, Lkr. München	160
Nr. 9	Buchendorf, Lkr. Starnberg	162
Nr. 10	Neufahrn, Lkr. Bad Tölz-Wolfratshausen	164
Nr. 11	Manching, Lkr. Pfaffenhofen a. d. Ilm	166
Nr. 12	Feldmoching, Lkr. München	168
Nr. 13	Holzhausen, Lkr. München	170
Nr. 14	Deisenhofen 3, Lkr. München	172
Nr. 15	Deisenhofen 1, Lkr. München	174
Nr. 16	Teufstetten, Lkr. Erding	176
Nr. 17	Reithofen, Lkr. Erding	178
Nr. 18	Papferding, Lkr. Erding	180
Nr. 19	Loipfing, Lkr. Erding	182
Nr. 20	Maxing, Lkr. Mühldorf am Inn	184
Nr. 21	Sondermoning, Lkr. Traunstein	186
Nr. 22	Oberhaimbuch, Lkr. Regensburg	188
Nr. 23	Pfeffenhausen, Lkr. Landshut	190
Nr. 24	Oberframmering, Lkr. Dingolfing-Landau	192
Nr. 25	Fehmbach, Lkr. Deggendorf	194
Nr. 26	Plattling-Pankofen, Lkr. Deggendorf	196
Nr. 27	Manndorf, Lkr. Deggendorf	198

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 2.1.	Chemische Verwitterungsarten	8
Tab. 2.2.	Grobeinteilung der in dieser Arbeit auftretenden Bodenhorizonte	10
Tab. 2.3.	Eisengehalte in Gesteinen	11
Tab. 2.4.	Arten der remanenten Magnetisierung von Stoffen	15
Tab. 2.5.	Magnetische Eigenschaften der wichtigsten Eisenoxide und –sulfide.....	19
Tab. 3.1.	Magnetometrisch nachweisbare Bebauungen der untersuchten Viereckschanzen in Korrelation mit Erhaltungszustand und Bodentyp.....	29
Tab. 3.2.	Zusammenhang zwischen Nachweisbarkeit der Bebauung und Bodentyp....	30
Tab. 4.1.	Seitenlängen (äußere Grabenlängen), Innenraumflächen und Eckwinkel der untersuchten Viereckschanzen	34
Tab. 4.2.	Bebauungssituation der untersuchten Viereckschanzen	35
Tab. 5.1.	Viereckschanze Papferding, Profilbeschreibung des westlichen Grabungsprofils 2, südlicher Teil: Bereich unter dem ehemaligen Wall	41
Tab. 5.2.	Viereckschanze Papferding, Profilbeschreibung des westlichen Grabungsprofils 2, nördlicher Teil: Bereich des ehemaligen Grabens	42
Tab. 5.3.	Viereckschanze Papferding, Profil 2, rechte Grabenhälfte: Ergebniswerte der Suszeptibilitätsmessungen	47
Tab. 5.4.	Viereckschanze Papferding, Zusammenstellung der Ergebniswerte der VFTB- Messungen im ehemaligen Wallbereich	59
Tab. 5.5.	Viereckschanze Papferding, Zusammenstellung der Ergebniswerte der VFTB-Messungen im ehemaligen Grabenbereich	60
Tab. 6.1.	Viereckschanze Fehmbach, typische Gesteinsstücke aus dem Grabenprofil C-D mit den Suszeptibilitäten dieser Einzelsteine und ihren jeweiligen Entnahmeschichten	68
Tab. 6.2.	Viereckschanze Fehmbach, Messwerte der Suszeptibilität aus dem Grabenprofil G-H im Ostgraben	69
Tab. 6.3.	Viereckschanze Fehmbach, Beschreibung der Schichten des Grabenprofils C-D.	70
Tab. 6.4.	Viereckschanze Fehmbach, Grabenprofil C-D, Suszeptibilitätsmessungen. Suszeptibilität in Korrelation mit den Schichten aus Tab. 6.3.....	70
Tab. 6.5.	Viereckschanze Fehmbach, Grabenprofil C-D, Suszeptibilitätsmessungen...	70
Tab. 6.6.	Viereckschanze Fehmbach, Beschreibung der Schichten des Grabenprofils E-F	72
Tab. 6.7.	Viereckschanze Fehmbach, Beschreibung des Probenmaterials für die Laboruntersuchungen	74
Tab. 7.1.	Viereckschanze Laibstadt, Beschreibung der Beprobungspunkte	87
Tab. 7.2.	Viereckschanze Laibstadt, Beschreibung von Profil 1, ungestörter Außenraum	89
Tab. 7.3.	Viereckschanze Laibstadt, Beschreibung von Profil 2, Grabenfüllung.....	89
Tab. 7.4.	Viereckschanze Laibstadt, Beschreibung von Profil 3, heutige Wallkrone...	90
Tab. 7.5.	Viereckschanze Laibstadt, Beschreibung von Profil 5, Innenraum mit positiver Anomalie	90

Kapitel 1. Einleitung

1.1. Fragestellung der Arbeit

Seit dem Jahr 1982 hatte die Arbeitsgruppe Geophysikalische Prospektion am Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege unter der Leitung von Dr. Helmut Becker und PD Dr. Jörg Faßbinder bis zum Beginn der hier vorliegenden Arbeit insgesamt 15 Prospektionen an Spätkeltischen Viereckschanzen durchgeführt. Mehrere Prospektionsergebnisse konnten damit bereits wichtige neue Beiträge zur Viereckschanzenforschung im Süddeutschen Raum liefern.

Teilweise waren die Ergebnisse dieser Messungen aber auch nicht interpretierbar und blieben dann unveröffentlicht, da die Wall- und Grabensituationen, welche obertägig oder anhand von Luftbildern erkennbar waren, in den Magnetogrammen in diesen Fällen kein verwertbares Ergebnis lieferten. Auch Bebauungsstrukturen konnten nicht in allen Anlagen identifiziert werden. Demgegenüber ließen sich bei Prospektionen an anderen Erdwerken wie z. B. Hallstattzeitlichen Herrenhöfen (BECKER [1996C]) sowie den auf ausgedehnten Lössflächen Niederbayerns liegenden Neolithischen Kreisgrabenanlagen (BECKER [1996B]) oft detailliertere Befunde nachweisen. Auch in Österreich konnten erfolgreiche Prospektionen an Kreisgrabenanlagen auf Lössböden durchgeführt werden, siehe z. B. EDER-HINTERLEITNER ET AL. [1999] sowie NEUBAUER ET AL. [1999].

Da Viereckschanzen dem gegenüber ein breiteres Bodenspektrum überdecken, lag die Fragestellung nach dem Zusammenhang zwischen Prospektionsergebnis und Bodentypen nahe. Auch die Rolle des Grundwassers bzw. stehenden oder zugeleiteten Wassers in den Gräben der Anlagen auf die magnetische Nachweisbarkeit der im Boden gebildeten Eisenoxide ist von zentraler Bedeutung, vor allem da die Frage nach der dauerhaften Wasserverfüllung der Gräben noch nicht geklärt ist.

1.2. Methodische Durchführung

Für die hier vorliegende Arbeit wurde die Reihe der Prospektionen an Viereckschanzen um zwölf weitere, gezielt ausgewählte Lokationen erweitert und zusammen mit den bereits in früheren Jahren magnetometrisch untersuchten Anlagen einer Gesamtbetrachtung unterzogen. Dabei entfällt die Beschränkung auf leicht interpretierbare Prospektionsergebnisse, welche allein bisher den Weg in die Veröffentlichung gefunden haben und damit das Bild vom vermeintlich sicheren Erfolg einer Magnetometerprospektion bestimmen.

Nachdem die Messbilder natürlich unschätzbaren Wert zur zerstörungsfreien Erkennung der archäologischen Befunde im Untergrund liefern, werden alle Prospektionen im Hinblick auf die archäologische Befund- und Bebauungssituation hin untersucht. Zusätzlich aber wird der Fokus bei der hier vorliegenden Arbeit erweitert um die Aussagefähigkeit fehlender bzw. negativer magnetischer Anomalien. Zum ersten Mal wird hiermit ein Gesamtüberblick über die bis 2011 am Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege durchgeführten Magnetometerprospektionen an spätkeltischen Viereckschanzen vorgestellt und in ihrer Variabilität der auftretenden positiven, negativen bzw. unklar ausgeprägten magnetischen Anomalien beleuchtet.

Die Ergebnisse sämtlicher Prospektionen werden im Katalogteil im Anhang der Arbeit vorgestellt. Sie sind korreliert mit Angaben zur Geologie, Boden- und Geländebeschreibungen sowie Nutzungsbedingungen seit der Zeit der kartografischen Uraufnahme im 19. Jahrhundert. Luftbilder, Magnetogramme und Interpretationspläne aller Anlagen verdeutlichen die Situationen visuell.

Zusätzlich soll versucht werden, mit ergänzenden bodenkundlichen Betrachtungen und magnetometrischen Laboruntersuchungen Gründe für die sich geophysikalisch sehr unterschiedlich abzeichnenden Befunde herauszuarbeiten. Zu diesem Zweck wurden an drei der mittels Magnetometerprospektion untersuchten Anlagen (Papferding, Fehmbach und Laibstadt) Bodenproben aus unterschiedlichen Tiefen und Bodenbereichen entnommen und um gesteinsmagnetische Laboranalysen im Institut für Geophysik in München und im Labor für Paläo- und Gesteinsmagnetik in Niederlippach ergänzt. An den Viereckschanzen von Papferding und Fehmbach waren wegen offener Grabungsschnitte durch Wall- und Grabenbereich sogar die direkte Beurteilung der darunter liegenden Bodenschichten und Messungen der tiefenabhängigen magnetischen Suszeptibilität in situ unmittelbar an den Profilflächen möglich.

In den Einzelkapiteln der Arbeit werden jeweils typische Messkurven und Diagramme dargestellt, die die Ausführungen und Argumentationen verdeutlichen. Ausführliche Messkurven der Labormessungen sind abgebildet in Anhang 2; sämtliche Messdaten der Laborexperimente finden sich zudem in Form von Excel-Dateien auf der beiliegenden CD. Die Daten der Magnetometerprospektionen liegen am Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege vor.

1.3. Überblick über die folgenden Kapitel

Kapitel 2 führt in die zum Verständnis der Arbeit wichtigsten Grundlagen der Archäologie an Viereckschanzen, der bodenkundlich relevanten Sachverhalte sowie der geophysikalischen, insbesondere der gesteinsmagnetischen Messungen ein.

In Kapitel 3 werden die an Viereckschanzen durchgeführten Magnetometerprospektionen aus geophysikalisch-methodischer Sicht betrachtet. Die Erkennbarkeit der archäologischen Befunde, vor allem der Schanzengräben als positive bzw. negative magnetische Anomalien oder ein Fehlen derselben, wird in den Zusammenhang mit den jeweils vorliegenden Bodentypen gestellt.

Kapitel 4 wertet die Ergebnisse der Magnetometerprospektionen im Hinblick auf archäologische Befunde aus. Die in den Messungen erfassten räumlichen Dimensionen der Viereckschanzen sowie die erkannten Bebauungssituationen werden in tabellarischen Übersichten zusammengestellt, wobei die einzelnen Magnetogramme und Interpretationspläne im Katalogteil in Anhang 3 komplett aufgeführt sind.

In Kapitel 5 werden die Prospektion an der Schanze von Papferding, der Grabungsschnitt durch Wall- und Grabenbereich sowie detaillierte Suszeptibilitäts- und Labormessungen betrachtet.

Kapitel 6 stellt die Magnetometerprospektionen an der Schanze von Fehmbach vor Beginn der dortigen Grabung sowie nach Abtragung des Oberbodens vor. Sie werden ergänzt durch Suszeptibilitätsmessungen und Beprobung im Grabenbereich sowie durch Labormessungen.

Kapitel 7 befasst sich mit den vor allem archäologisch sehr interessanten Ergebnissen der Prospektion in Laibstadt sowie den dort durchgeführten Bodensondagen und Labormessungen.

In Kapitel 8 werden die Ergebnisse der magnetometrischen und bodenkundlichen Arbeiten zusammengestellt.

Kapitel 9 liefert eine kurze Zusammenfassung der Arbeit.

Kapitel 2. Grundlagen und Forschungsstand

2.1. Archäologie: Viereckschanzen

2.1.1. Kurzbeschreibung der Anlagenformen

Bei den Spätkeltischen Viereckschanzen, umgangssprachlich auch als „Keltenschanzen“ bezeichnet, handelt es sich um annähernd quadratische oder rechteckige Wall- und Grabenwerke, deren Seitenlängen überwiegend bei 70 bis 100 Metern liegen. Ihre Geländemerkmale sind heute noch teilweise erkennbar, wogegen die rein in Holzbauweise ausgeführte Bebauung mittlerweile zersetzt ist.

Einen guten einführenden Überblick über diese Anlagenform bietet WIELAND [1999]: Einem Erdwall mit ursprünglich wohl etwa 3-4 Metern Höhe und 6-8 Metern Breite am Wallfuß ist ein umlaufender Spitzgraben vorgelagert, dessen ehemalige Tiefe, bei einer Breite von 5-6 Metern, zu etwa 2-3 Metern angenommen wird; der Grabenaushub liefert hierbei das Wallbaumaterial. Der Wall wird von einem einzigen Zugang durchbrochen, welcher mit einem Torbau versehen war. Der davor liegende Grabenbereich wurde mittels einer Holzbrücke überspannt. Die spärliche Innenbebauung beschränkte sich typischerweise auf ein oft dem Eingang gegenüberliegendes rechteckiges Hauptgebäude mit Seitenlängen bis etwa 20 Meter, einigen kleineren Nebengebäuden, Grubenhäusern sowie manchmal auch Brunnen- oder sonstige Schächte.

Abbildung 7.5. zeigt eine grafische Rekonstruktion einer Viereckschanze, die anhand der Prospektionsergebnisse der Anlage von Laibstadt erarbeitet wurde (siehe Kapitel 7).

Zwei Beispiele von heute noch gut obertägig sichtbaren Viereckschanzen finden sich im südlichen Großraum Münchens: Die im offenen Gelände liegende Anlage von Buchendorf bei Gauting im Landkreis Starnberg ist mit der gesamten Wallumfassung bis zu einer Höhe von etwa 2 Metern erhalten und zeigt einen guten Überblick über die laterale Ausdehnung einer solchen Gesamtanlage, während die Viereckschanze südlich von Endlhausen im Landkreis Bad Tölz-Wolfratshausen durch ihre geschützte Waldlage gerade im Bereich der exzellent erhaltenen Südwestecke eine Ahnung von den früheren eindrucksvollen Höhendimensionen vermittelt.

2.1.2. Verbreitung

Spätkeltische Viereckschanzen finden sich hauptsächlich in Bayern und Baden-Württemberg. Das Verbreitungsgebiet wird im Wesentlichen nach Süden hin eingegrenzt durch die Alpen, im Nordosten durch die Donau. Im Westen und Nordwesten bilden Rhein und Main eine weniger scharfe Grenze. Auch in Tschechien sind Viereckschanzen aufzufinden, ebenso wie ähnliche Anlagen auch in Frankreich existieren.

Einen umfassenden Überblick über die Verbreitung sowie Geländemerkmale obertägiger Viereckschanzen in Bayern liefert der Atlas von SCHWARZ [1959] mit dem zugehörigen Textband SCHWARZ [2007]. Die obertägigen Anlagen in Baden-Württemberg werden beschrieben in BITTEL ET AL. [1981] sowie im Atlas von BITTEL ET AL. [1990], in letzterem ebenfalls mit Text- und Kartenteil. Die beiden Atlanten zeigen den Größen- und Formenreichtum der Viereckschanzen, wobei auch vom angenäherten Rechteck abweichende Grundrisse (wie z.B. Trapez- und Fünfeckform) oder größere Anlagen, dann meist mehrteilig, beschrieben werden. Die Ergänzung der Fundstellen von Viereckschanzen mit Hilfe der Luftbildarchäologie führte zu der erweiterten Karte in IRLINGER [1996A].

2.1.3. Datierung und Klassifizierung als Viereckschanzen

Viereckschanzen datieren in die späte Latènezeit, also den Zeitraum zwischen 200 v. Chr. und 50 v. Chr. Charakteristisch ist die Fundarmut in den Viereckschanzen. Funde beschränken sich im Allgemeinen auf wenige Teile datierender Graphittonkeramik, Knochenreste etc. Eventuell vorhandene holzverschaltete Brunnen können eine zeitliche Einordnung per Dendrochronologie ermöglichen wie beispielsweise in Fellbach-Schmidlen (PLANCK [1982]) oder Plattling-Pankofen (Literatur siehe Anhang 3, Nr. 26). Da an der überwiegenden Anzahl von Viereckschanzen keine Grabungen durchgeführt wurden, erfolgt ihre Einordnung in spätkeltische Zeit hauptsächlich über die charakteristischen, im Gegensatz zu anderen Erdwerken spitz zulaufenden Ecken. Diese lassen sie auch in der Luftbildarchäologie relativ eindeutig klassifizieren (IRLINGER [1996B]). Ist allerdings nur noch ein Teil der Gesamtanlage obertägig oder im Luftbild erkennbar, so kann es in Einzelfällen zu Verwechslungen mit formähnlichen Befunden wie z. B. Burgstätten kommen, weshalb auch bei den bereits bekannten Anlagen ihre Typisierung als Viereckschanze und damit deren in der Literatur angegebene Gesamtzahl leicht variiert.

2.1.4. Archäologische Forschungsgeschichte

Die Anfänge der Viereckschanzenforschung wurden bereits mehrfach ausführlich dargestellt (beispielsweise bei WIELAND [1999]), hier soll nur ein kurzer Überblick gegeben werden.

Im 19. Jahrhundert begann die ernsthafte Beschäftigung der Bevölkerung mit obertägigen Bodendenkmälern. Viereckschanzen wurden wegen ihrer regelmäßigen Form zunächst meist als römische Lager interpretiert, aber auch im Zusammenhang mit historischen Ereignissen des Mittelalters oder dem Dreißigjährigen Krieg („Schwedenschanze“) gesehen, bevor um 1870 erste Datierungsansätze auf keltische Zeit hinwiesen. Zudem waren diese Anlagen auch Ursprung von Aberglauben und Mythen, der Volksglauben vermutete in ihnen versunkene Schlösser, Wohnstätten von Riesen und dergleichen.

Der Begriff „Viereckschanze“ stammt vom Bayerischen Landeskonservator P. Reinecke, der diesen Ausdruck im Jahr 1910 geprägt hat (REINECKE [1921-22]). Er interpretierte diese Denkmäler als befestigte Gutshöfe. Schon 20 Jahre später deutete F. Drexel in seinem Aufsatz „Templum“ die Viereckschanzen als spätkeltische Heiligtümer. In der Folgezeit wurden Sinn und Zweck der Anlagen kontrovers diskutiert. Die Interpretationsvorschläge reichen von Kultanlagen über Verteidigungswerke, Zentren dörflicher Strukturen oder Einzelgehöfte bis hin zu Viehgehegen.

Die Grabung an der Viereckschanze von Holzhausen II in den Jahren 1957 bis 1959 setzte wieder einen stärkeren Akzent auf die kultische Deutung. SCHWARZ [1960] und [1975] interpretierte ein Eckgebäude als Umgangstempel und zwei Schachtanlagen wegen der darin erhaltenen organischen Spuren als Opferschächte. Erst Jahrzehnte später wurde die Zweckbestimmung als Kultanlagen wieder in Frage gestellt, wobei die verschiedensten Interpretationsversuche sich bis in die Gegenwart fortsetzen (REICHENBERGER [1994]; HAFFNER [1995], IRLINGER [2005]).

Neue Datengrundlagen wurden dabei unter anderem erarbeitet durch Grabungen an den Viereckschanzen von

- Fellbach-Schmidlen 1977-80 (PLANCK [1982])
- Bopfingen-Flochberg 1989-1992 (KRAUSE & WIELAND [1993])
- Riedlingen 1991-1997 (KLEIN [1991], KLEIN [1995], KLEIN [1996]), BOLLACHER [2009])

- Plattling-Pankofen 1994 (REICHENBERGER & SCHAICH [1995] ; SCHAICH [1995]; REICHENBERGER & SCHAICH [1996])
- Pocking-Hartkirchen 1996 (SCHAICH & WATZLAWIK [1997]; SCHAICH [1998])
- Beuren 1996-1997 (AMBS [1999]; AMBS [2011])
- Mengen-Ennetach 1998 (VON DER OSTEN-WOLDENBURG ET AL. [1999])

Zudem lieferten unter anderem die Magnetometerprospektion einer doppelten Schanze bei Kirchheim-Osterholz (VON DER OSTEN-WOLDENBURG [2002]), magnetische und bodenkundliche Untersuchungen an den Viereckschanzen von Sallach (HOFFMANN ET AL. [2006]; HOFFMANN [2007]; MÜLLER [2008]), sowie die Landnutzungsuntersuchungen an der Viereckschanze von Poign (LEOPOLD [2003]) wichtige Erkenntnisse.

Momentan überwiegt in der Forschung die Deutung von Viereckschanzen als dörfliche Zentren oder Gutshöfe (KRAUSE & WIELAND [1993]; NETH [2005]), wobei auch kultische Aspekte in ihrer Nutzung mit eingeschlossen sein könnten.

Die vorliegende Arbeit stellt mittels der Beschreibung der magnetometrisch erkennbaren Befunde und der Bebauungsstrukturen weiteres Material als Diskussionsgrundlage zur Verfügung.

2.1.5. Erfassung verebneter Anlagen durch Luftbildarchäologie

Im Jahr 1980 wurde am Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege die Luftbildarchäologie als immens wichtige Informationsquelle über Bodendenkmäler installiert (CHRISTLEIN & BRAASCH [1982]; BECKER [1996A]). Mit ihrer Hilfe wurden in den letzten Jahrzehnten über 100 verebnete Schanzen neu entdeckt, die bislang aus historischen Quellen noch nicht bekannt waren (IRLINGER [1996A], IRLINGER [1996c], IRLINGER [2004]). Neben obertägig noch in minimalen Resten erhaltenen Anlagen, die vor allem im Schräglicht der tief stehenden Sonne aus der Luft wesentlich besser sichtbar werden als am Erdboden, zeigen sich auch vollständig verebnete Bodendenkmäler anhand von positiven oder negativen Bewuchs-, Feuchte- oder Schneemerkmalen (BRAASCH [1983], BRAASCH [1986], LEIDORF [1996], LEIDORF [1999]).

2.1.6. Detaillierung mittels Magnetometerprospektion

Die Magnetometerprospektion zur genaueren Untersuchung archäologischer Bodendenkmäler wurde in Deutschland erstmals am Rheinischen Landesmuseum Bonn eingesetzt (SCOLLAR [1970]; SCOLLAR [1975]). Seit 1982 fand die Methode auch ihren festen Einsatz am Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege (BECKER [1996E]; WINGHART [1996]), wobei die hier in der Archäologie erstmals verwendeten Cäsiummagnetometer eine deutlich höhere Messgeschwindigkeit ermöglichten als die früher eingesetzten Protonenmagnetometer.

Die Anwendung magnetometrischer und anderer geophysikalischer Prospektionsverfahren in der Archäologie wurde mittlerweile mehrfach beschrieben, z. B. in AITKEN [1958], AITKEN [1974], SCOLLAR ET AL. [1990], CLARK [1990] und ASPINALL ET AL. [2008]. Die Bandbreite der geophysikalischen Prospektion an archäologischen Bodendenkmälern auf internationaler Ebene zeigt der Konferenzband *Archaeological Prospection*, herausgegeben von FABBINDER & IRLINGER [1999A]. Aktuelle Fortschritte in der Kombination unterschiedlicher Prospektionsmethoden werden vorgestellt in FABBINDER [2011]. Die Verbindung von archäologischer Prospektion und gesteinsmagnetischen Untersuchungen ist erläutert in FABBINDER [2009].

Spätkeltische Viereckschanzen gehören neben Neolithischen Kreisgrabenanlagen (z. B. BECKER [1996B] und NEUBAUER ET AL. [1999]) und Hallstatt-Herrenhöfen (BECKER [1996C]) zu den wichtigsten Erdwerken, die mit Hilfe der Magnetometerprospektion anhand von zahlreichen Beispielen untersucht wurden.

2.1.7. Satellitenbildaufnahmen

In den letzten Jahren spielen auch flächendeckend durchgeführte Satellitenbildaufnahmen wie im „Bayern Viewer“ oder in „Google Earth“ eine Rolle. Diese öffentlich verfügbaren Orthofotos können als weitere Bildmaterialquelle zur Erfassung bislang unbekannter Bodendenkmäler herangezogen werden. Ein Beispiel für eine durch ein Bayern Viewer-Luftbild neu entdeckte Viereckschanze ist die Anlage von Hechendorf-Güntering, die im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls prospektiert wurde (siehe Anhang, Anlage Nr. 6; BERGHAUSEN [2010c], KAINDL [2010]).

2.1.8. Digitale Geländemodelle

Luftbildarchäologie führt vor allem über Gras- und Ackerland zu Erkenntnissen über verebnete Anlagen. Da sie eine von Baumbewuchs freie Sicht auf den Erdboden voraussetzt, folgt umgekehrt, dass speziell in Waldgebieten keine verebneten Schanzen bekannt sind. Hier sind allerdings auch obertägige Anlagen, die sich in der Höhendifferenz nur noch minimal von der Umgebung abheben, vor Ort mit dem bloßen Auge kaum zu erkennen.

Eine Abhilfe hierbei kann die Laserscanning- oder LIDAR-Methode (Light detection and ranging) liefern: Ein Laser im Boden eines kleinen Flugzeugs, welches in Höhen von mehreren hundert Meter fliegt, sendet ein Strahlenbündel auf die Erdoberfläche. Die Strahlen werden an ihr reflektiert und zum Sensor im Fluggerät zurückgeworfen. Aus dem Zeitpunkt des Eintreffens, kombiniert mit Daten aus dem Positionierungssystem GPS, können extrem genaue Digitale Oberflächen- bzw. Geländemodelle (DOM / DGM) erarbeitet werden. Diese Methode liefert auch über bewaldeten Flächen sinnvolle Ergebnisse, da immer ein Teil der Strahlen zum Erdboden durchdringt und zur Auswertung herangezogen wird. KERSCHER [2008] konnte die Stärke der Methode eindrucksvoll anhand der genauen Positionierung eines ehemaligen römischen hölzernen Wachturms in Limesgebiet darstellen. In Baden-Württemberg wird die teilautomatisierte Auswertung von Laserscanningdaten als Pilotprojekt zur flächendeckenden Neuerfassung bislang unerkannter Geländemerkmale und archäologischer Denkmäler eingesetzt (BOFINGER & HESSE [2011]).

In der vorliegenden Arbeit ist das digitale Geländemodell der Viereckschanze Deisenhofen 3 abgebildet, da sich diese in Waldlage befindet und daher kein aussagekräftiges Luftbild zur Verfügung steht (siehe Anlage 3: Katalog der Viereckschanzen, Nr.14).

2.2. Bodenkundliche Aspekte

2.2.1. Einführende Literatur

Da in der vorliegenden, interdisziplinär ausgerichteten Arbeit eine Einführung in die Bodenkunde den Rahmen sprengen würde, sei hierbei auf die Literatur verwiesen.

Eine sehr anschauliche Einführung in die Bodenkunde bietet STAHR ET AL. [2008]. Das umfassende Standardwerk zur Bodenkunde ist SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL [2010]. Einen kurzen Überblick in Stichworten liefert SCHROEDER & BLUM [1992].

2.2.2. Geologische Ausgangssituation, Verwitterung und Bodenbildung

Geologisch gesehen lässt sich Bayern in vier Grundeinheiten unterteilen: Das nordost-bayerische kristalline Grundgebirge; das Deckgebirge nördlich der Donau bis zum Spessart mit jungpaläozoischen bis mesozoischen Sedimentgesteinen von 300 bis 500 Metern Mächtigkeit; das Molassebecken zwischen Donau und Alpenrand sowie die Alpen selbst. Die untersuchten Viereckschanzen liegen hierbei im weit überwiegenden Teil im Bereich des Molassebeckens; würmeiszeitliche oder ältere Untergründe sind ebenso vertreten wie nacheiszeitliche Aue- und Talfüllungen. An den Standorten der nördlich der Donau gelegenen Anlagen finden sich Tongesteine des Jura und der Trias. Einzelheiten zur geologischen Situation jeder prospektierten Anlage finden sich im Gesamtüberblick im Anhang der Arbeit.

Aus den Gesteinen als „Rohmaterial“, das durch die geologische Situation vorgegeben ist, bildeten sich die Böden. Die für die Bodenbildung bestimmenden Größen sind die abiotischen Faktoren Ausgangsgestein, Klima (Temperatur, Feuchtigkeit) und Geländere relief sowie die biotischen Faktoren Flora, Fauna sowie der Mensch.

Den ersten Schritt im Übergang vom Rohgestein zum Boden bildet die physikalische Verwitterung. Die wichtigsten Mechanismen dabei sind Frostsprengung durch den Gefrierdruck von in Spalten eindringendes Wasser, Temperatursprengung durch wechselnde Erwärmung und Abkühlung der Gesteinsoberfläche, Salz- und Wurzelsprengung sowie Abrieb. Die Ansiedlung erster Moose und Flechten führt zur weiteren Zerstörung des Ausgangsgesteins. Nachdem sich erste Lockerungserscheinungen des Ausgangsgesteins bemerkbar gemacht haben, treten vermehrt durch biotische und abiotische Prozesse chemische Verwitterungsarten mit Stoffzu- und Abfuhr auf: Hydrolyse, Säure-, Lösungs- und Oxidationsverwitterung sowie Komplexbildung (siehe Tabelle 2.1.).

Chemische Umsetzungen und ihre jeweiligen Umkehrungen spielen auch weiterhin bei der fortdauernden Bodenbildung eine wichtige Rolle und sind je nach den herrschenden Gegebenheiten (pH-Wert, aerobe oder anaerobe Bedingungen) unterschiedlich relevant.

Die wichtigsten Prozesse und ihre Umkehrprozesse sind:

Hydrolyse ↔ Alkalisierung,

Oxidation ↔ Reduktion,

Hydratation ↔ Dehydratation,

Auflösung ↔ Ausfällung.

Hydrolyse	Die wichtigste Form chemischer Verwitterung. Wassermoleküle liegen teilweise aufgespalten als H^+ - (bzw. H_3O^+ -) Ionen und OH^- -Ionen vor, welche am Gestein angreifen. Beispiel Kalifeldspat (Orthoklas): $KAlSi_3O_8 + H_2O \rightarrow KAlSi_3O_8 + H^+ + OH^- \rightarrow HAlSi_3O_8 + KOH$ Die entstehende Kalilauge kann dabei ausgewaschen werden \rightarrow Materialverlust durch Entbasung des Bodenbereichs.
Säureverwitterung	Im Boden stets vorhanden ist Kohlensäure wegen des bei der Wurzelatmung freigesetzten CO_2 , das sich mit Wasser zu H_2CO_3 verbindet. Auch Salzsäure, Salpetersäure und Schwefelsäure können im Boden gebildet werden. Beispiel Kalzit: $CaCO_3 + H_2SO_4 + H_2O \rightarrow CaSO_4 \times 2H_2O + CO_2 \uparrow$
Lösungsverwitterung	Minerale werden entsprechend ihrem Löslichkeitsprodukt in Wasser aufgelöst. Beispiel: Steinsalz $NaCl$. Weniger wichtig bei den meisten Gesteinsarten.
Oxidationsverwitterung	Eisen, Mangan und Schwefel kommen in vielen Gesteinen in zweiwertiger Form vor. Bei Oxidation in höhere Wertigkeitsstufen stimmt die elektrische Ladung des Kristallgitters nicht mehr, weshalb einzelne Kationen ausgestoßen werden.
Komplexbildung (organ. Verwitterung)	Die durch Verwitterung freigesetzten metallischen Kationen verbinden sich mit niedermolekularen organischen Verbindungen zu stabilen Chelaten.
<i>Tab. 2.1.: Chemische Verwitterungsarten. Modifiziert nach STAHR ET AL. [2008].</i>	

2.2.3. Böden im Untersuchungsgebiet

Am Ort der prospektierten Viereckschanzen treten im wesentlichen die im Folgenden angeführten Bodentypen auf. Diese Kurzcharakterisierung folgt SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL [2010] nach dem in Deutschland üblichen Bodenklassifikationssystem, das vom Arbeitskreis für Bodensystematik der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft erstellt und laufend ergänzt wird (AK BODENSYSTEMATIK [1998]).

Pararendzina: Dieser Boden entwickelt sich aus einem kalkreichen C-Horizont (siehe Tabelle 2.2.) wie Schotter oder Löss durch Humusakkumulation und mäßige Carbonatverarmung; ein B-Horizont fehlt. Die Auswaschung der Carbonate führt zum Massenverlust und zur relativen Anreicherung von Silicaten und Oxiden als Lösungsrückstand, so dass auch Eisen zur magnetischen Nachweisbarkeit in ausreichender Menge vorhanden ist. Die Pararendzina aus festem Carbonatgestein ist oft flachgründig, aus Löss tiefgründig und nährstoffreich. Durch die intensive Tätigkeit von Bodenorganismen ist sie trotz hoher Tongehalte gut durchlüftet und trocken. Unter Waldboden entwickelt sich aus ihm bald eine Braunerde (siehe auch Viereckschanze Nr. 14, Deisenhofen 3).

Braunerde: Ein humoser Ah-Horizont geht gleitend in einen braun gefärbten Bv-Horizont über. Der C-Horizont wird oft erst in 25 bis 150 cm Tiefe erreicht. Braunerde entsteht aus Pararendzinen und anderen frühen Bodenentwicklungstypen, wenn die Verlehmung und durch Fe-Oxide hervorgerufene Verbraunung die tieferen Bodenschichten erreicht, in denen kein Humus mehr akkumuliert wird. Sie ist weit verbreitet auf silikatreichen, Ca- und Mg-armen Gesteinen und enthält große Mengen an Fe- und Al-Oxiden. Ihre Körnung umfasst Sand, Schluff und Lehm, so dass durch die teilweise höhere Partikelgröße eine gute Wasser-

durchlässigkeit gewährleistet ist. Braunerde wird wegen ihrer Flachgründigkeit und des hohen Steingehalts oft forstlich genutzt.

Parabraunerde: Sie gehört zu den verbreitetsten Böden in Mitteleuropa und entwickelt sich hier vor allem aus Pararendzina und Braunerde durch schwache Versauerung und damit einhergehende Tonverlagerung vom A- in den B- Horizont mit der Horizontfolge Ah/Al/Bt/C, wobei der ton- und eisenverarmte Bleichhorizont bis 60 cm mächtig sein kann. Die tonangereicherten tieferen Schichten besitzen Subpolyeder- bis Prismengefüge. In niederschlagsreichen Gebieten führt die Entwicklung über Pseudogley-Parabraunerde zu Pseudogleys mit starker Fe-Umlagerung und Marmorierung (siehe hierzu auch Kapitel 5, Papferding). Trotz seines hohen Gehalts an Feinporen ist der Bt-Horizont gut durchwurzelt und belüftet, zeigt aber auch ein hohes Wasserspeichervermögen. Somit ist die Parabraunerde ackerbaulich gut nutzbar, wobei Parabraunerde aus Löss wegen der Verschläffung des Oberbodens zur Verschlämmung, Staunässe und Erosion neigt.

Pseudogley: Während der Gley als Grundwasserboden die Horizontfolge Ah/Go/Gr (mit dem bräunlich verrosteten Oxidations- und dem graugrünen bis fahlblauen Reduktionshorizont) aufweist, gehört der Pseudogley zur Klasse der Stauwasserböden. Der Wechsel von niederschlagsbedingtem Stauwasser und Austrocknung über dichten Unterbodenlagen lässt in diesem grundwasserfernen Boden Konkretionen und Rostflecken im Aggregatinneren entstehen. Die gleichzeitige Ausbleichung der Aggregatoberflächen führt zur typischen Marmorierung des Pseudogleys. In den Rostflecken dominiert neben Goethit auch der orangefarbige, paramagnetische Lepidokrokit (die gesteinsmagnetisch relevanten Minerale werden in Kapitel 2.3.2.5 vorgestellt). Pseudogleys sind kleinflächig auftretende, aber weit verbreitete Böden im humiden Klimabereich. In Deutschland findet man sie auf niederschlagsreichen ebenen Lössgebieten oder in trockenen Gebieten auf stark verdichteten und verlehnten Sedimenten und auf Ton. Sie stellen gute Grünland- und Waldstandorte dar, Ackerbau ist aber wegen der Frühjahrsvernässung und sommerlicher Trockenheit erschwert (siehe auch Kapitel 7 / Laibstadt).

Löss und Lehm sind keine Bodentypen im Sinne der Bodensystematik. Mit Löss werden quartäre äolische Sedimente bezeichnet, die meist carbonathaltig und deutlich gelb gefärbt sind. Sein Korngrößenspektrum reicht von Ton über Schluff zu Sand, wobei der Schluff mit etwa 65-80% deutlich überwiegt. Lehm dagegen stellt ganz allgemein ein Substrat mit der Mischung der Korngrößen von Ton, Schluff und Sand dar.

2.2.4. Geländesituationen

Die topografischen Lagen der Viereckschanzen sind verbunden mit bestimmten geländeabhängigen Klimabedingungen. Da extreme Geländelagen wie z. B. exponierte Höhenlagen im alpinen Bereich bei den Viereckschanzen fehlen, sind Temperatur und Niederschlagsmenge im Untersuchungsgebiet großräumig zunächst relativ gleichförmig. Die aktuellen Jahresniederschlagssummen liegen zwischen 650 und 1300 mm. (Quelle: GeoFachdatenAtlas, Bodeninformationssystem Bayern, Bayerisches Landesamt für Umwelt, www.bis.bayern.de). Die Klimafaktoren werden allerdings auch kleinräumig vom Gelände relief (z. B. Nord- oder Südhang, im Tal oder in ebener Lage) beeinflusst. Dieses zeigt auch einen starken Einfluss auf Erosionsprozesse.

Damit wirkt sich die Geländeform auch in hohem Maße auf lokale Bodenbildungsprozesse aus. So kommt es in hügeligem Gebiet zu Bodengesellschaften mit Hang- und Senkengefüge (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL [2010]): An einem Hangfuß im Kolluviumsbereich zeigt sich

eine völlig andere Bodensituation als im hangaufwärts gelegenen Erosionsbereich mit teilweise gekappten Oberböden.

Einzelheiten zu den Geländemerkmale finden sich im Gesamtüberblick der prospektierten Anlagen im Anhang der Arbeit.

Organische Horizonte	L	Streuauflage (<i>litter</i>)
	H	Humuslage
Oberboden	A	Mineralischer Oberbodenhorizont mit organischer Substanz
	fA	fossiler Oberboden
	jA	anthropogen umgelagertes Substrat
	Ai	initialer Oberboden
	Ah	humoser Oberboden
	Al	tonverarmter Oberboden (<i>lessiviert</i>)
Unterboden	B	Mineralischer Unterbodenhorizont
	Bt	Unterbodenhorizont mit Tonanreicherung
	Bv	verbraunter Unterboden
Grundwasserboden	G	Semiterrestrischer Bodenhorizont mit Grundwassereinfluss
	Go	Grundwasserhorizont, oxidiert
	Gr	Grundwasserhorizont, reduziert
Sediment- Horizont	M	Bodenhorizont aus sedimentiertem Material (Kolluvium)
Stauwasserboden	S	Unterboden mit Stauwassereinfluss
	Sd	Stauwasserhorizont, dicht stauend
	Sw	Stauwasser leitend
Toniger Horizont	T	Unterboden aus Lösungsrückstand von Carbonatgesteinen, Tongehalt ≥ 65 Masse-%
Ausgangsgestein	C	Untergrundhorizont
	Ct	tonangereicherter Untergrundhorizont
	Cv	verlehmter Untergrundhorizont
Tab. 2.2.: Grobeinteilung der in dieser Arbeit auftretenden Bodenhorizonte. Vereinfacht nach AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN [2005].		

2.2.5. Wassernähe, Wasserzuläufe zum Graben

In seiner Zusammenstellung früherer Forschungsergebnisse bemerkt WIELAND [1999] (S. 29): „Die Nähe vieler Viereckschanzen zum Wasser, zu Quellen und zu kleinen Wasserläufen, aber auch zu feuchtem Gelände wird immer wieder festgestellt, wobei unklar geblieben ist, bis zu welcher Distanz von Wassernähe gesprochen werden kann. (...) Besondere Schwierigkeiten bei der Beantwortung dieser Frage liegen auch in der Ungewissheit über die einstigen hydrologischen Verhältnisse. In den letzten 100 Jahren wurden diese durch Bach- und Flussbegradigungen, Drainierungen, durch Grundwasserabsenkungen infolge starker Wasserentnahmen und durch Quelfassungen grundlegend verändert.“ Er postuliert Wassernähe bei 45% aller Anlagen, wobei er sich auf eine Gewässerentfernung bis 300 Meter bezieht.

Im Lauf der Untersuchungen für die vorliegende Arbeit erwies sich der Faktor Wasser in den Viereckschanzengräben als ein zentraler Punkt für die Erklärung der unterschiedlichen Ausprägung magnetischer Anomalien. Daher werden Angaben zu rezenten Quellen und Bachläufen jeder Anlage im Katalogteil (Anhang 3) unter dem Punkt Geländebeschreibung aufgeführt.

2.2.6. Eisen bei der Bodenbildung

Das für magnetische Untersuchungen wichtige Eisen ist in der Regel im Ausgangsgestein enthalten, es gehört zu den häufigsten Elementen in der kontinentalen Erdkruste. Diese besteht zur Hälfte (gewichtsmäßig gesehen) aus Sauerstoff und zu ca. 25 % aus Silizium; Quarz (SiO_2) nimmt 58 % der Gesamtmasse ein. Der Rest setzt sich fast vollständig aus den Kationen des Al, Fe, Mg, Ca, Na und K zusammen, sie sind aber ursprünglich in Silikaten gebunden. Die Oxide und Hydroxide dieser Elemente sind in dieser Form meist noch nicht im Gestein enthalten, sondern entstehen sekundär als Verwitterungsneubildungen, weshalb sie in den meisten Böden und Sedimenten zu finden sind.

Eisen ist mit durchschnittlich 5 % nach Aluminium das zweithäufigste Metall in der kontinentalen Kruste. Es ist in unterschiedlichen Gesteinsuntergründen in unterschiedlich starkem Maße vertreten, siehe hierzu Tabelle 2.3.

Hierbei ist zu betonen, dass aufgrund chemischer Umbildungen der primären Eisenminerale die magnetischen Eigenschaften von Böden nicht unbedingt diejenigen des Ausgangsgesteins widerspiegeln. Kapitel 2.3.2.5. bietet einen Überblick über die für die Gesteinsmagnetik wichtigen Eisenminerale und ihre charakteristischen magnetischen Eigenschaften.

Gestein	Eisengehalt
basaltisch-gabbroide Gesteine	8,6 %
Tonsteine	4,8 %
Sandsteine	0,9 %
Fluviatile Sande	0,2 %

Tab. 2.3.: Eisengehalte in Gesteinen, nach SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL [2010].

2.3. Feld- und gesteinsmagnetische Untersuchungen

2.3.1. Prinzipielle Betrachtungen / Überblick

Magnetische Untersuchungen sind vor allem deshalb so erfolgreich, da der elementare Magnetismus der Materie auf atomphysikalischen Vorgängen, genauer gesagt auf den Spins und Bahnbewegungen der Atomelektronen, beruht und daher jegliche Materie ihre spezielle Art des Magnetismus trägt. Magnetische Untersuchungen sind hochempfindlich: Schon ein extrem geringer Gehalt an magnetischem Material von weniger als 1/1000 der Probe ist experimentell nachweisbar. Zudem ist das Element Eisen, nach Sauerstoff, Silizium und Aluminium, das vierthäufigste der Erdkruste und weltweit vertreten. Dabei tritt das Eisen nicht elementar, sondern gebunden in Form diverser Eisenoxide und -sulfide auf, die sich in ihren magnetischen Eigenschaften deutlich voneinander unterscheiden. Letztere können daher zur Charakterisierung der einzelnen Eisenminerale herangezogen werden, welche wiederum Rückschlüsse auf die in situ vorhandenen früheren Bildungsfaktoren zulassen.

Feldmagnetische Untersuchungen stellen dabei makroskopische Methoden dar, die je nach verwendetem Messinstrument das Erdmagnetfeld als Totfeld oder in seinen einzelnen Richtungskomponenten messen. Die Beschreibung des Feldes und seiner Größen ist in zahlreichen geophysikalischen Lehrbüchern dargestellt, z. B. in TELFORD ET AL. [1990], weshalb an dieser Stelle auf seine Darstellung verzichtet wird.

Es sei hier nur kurz erwähnt, dass das magnetische Erdfeld je nach Ort auf der Erde eine Stärke von etwa 22.000 bis 65.000 nT (Nanotesla = 10^{-9} Tesla) hat, mit etwa 48.000 nT in Deutschland. Demgegenüber weisen die archäologischen Befunde magnetische Anomalien von typischerweise maximal 2-10 nT, in Ausnahmen bis 100 nT auf. Zudem unterliegt das Erdfeld durch den Zustrom geladener Teilchen von der Sonnenoberfläche ständig zeitlichen Schwankungen im Sekunden- bis Stundenbereich und länger, die mit ihren Spitzen die Stärke der archäologisch relevanten räumlichen Anomalien um das Vielfache übertreffen können. Üblicherweise werden diese Einflüsse durch die Datenverarbeitung erfolgreich aus den Messungen eliminiert, nur in Zeiten erhöhter solarer Aktivität („Sonnensturm“) sind Störungen in den Ergebnissen der Magnetometerprospektionen erkennbar.

Bei der archäologischen Magnetometerprospektion deckt die Untersuchung im Idealfall die gesamte Befundfläche ab. Die gebräuchlichsten Typen der verwendeten Messgeräte sind hierbei Cäsiummagnetometer (BLOOM [1960], ALEXANDROV & BONCH-BRUEVICH [1992]) mit einer Empfindlichkeit im Picotesla-Bereich ($1 \text{ pT} = 10^{-12} \text{ T}$), welche das magnetische Totfeld in situ erfassen, sowie Fluxgatemagnetometer (FÖRSTER [1955]), die nur die einzelnen Vektorkomponenten des Magnetfeldes messen. Bei letzteren wird üblicherweise durch das Übereinandersetzen zweier Einzelsonden in Gradiometeranordnung innerhalb des Gerätes der Gradient der magnetischen Z-Komponente ermittelt. Zum Vergleich von Fluxgate-Gradiometer und Cäsium-Magnetometer siehe auch BECKER [1996D] sowie FABBINDER ET AL. [2009]. Beiden Arten von Messgeräten ist gemeinsam, dass sie an jedem einzelnen Messpunkt die dortige Überlagerung der Wirkungen der remanenten mit der durch das Erdfeld induzierten Magnetisierung messen (siehe Kapitel 2.3.2.4.) Die vorliegende Arbeit betrachtet Prospektionen, die am Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege unter Verwendung der Cäsiummagnetometer Scintrex CS2 (BECKER [1997]) und Scintrex Smartmag SM4G-Special durchgeführt wurden; siehe hierzu auch Anhang 1.

Die Ergebniswerte der Prospektionen, also die an jedem Messpunkt ermittelten Werte des Magnetfeldes, werden rechnerisch auf den magnetischen Mittelwert der Messfläche normiert. Die Abweichungen von diesem Normwert stellen dann die jeweils vorliegenden positiven oder negativen Anomalien an den einzelnen Messpunkten dar. Durch geeignete Methoden der

Bildverarbeitung werden diese Abweichungen vom Mittelwert in 256 Graustufen optisch abgebildet. Damit ergeben sich für das Auge gut erkennbare „magnetische Landkarten“ der Untersuchungsfläche, die im Rahmen dieser Arbeit als Magnetogramme bezeichnet werden.

Zu den Feldmethoden gehört auch die isolierte Bestimmung der induzierten Magnetisierung des Bodens am Messort mit Hilfe eines Kappameters SM-30 der Firma ZH Instruments (Anhang 1). Wegen des relativ hohen Zeitaufwandes wird hierbei üblicherweise jeweils nur eine Messfläche von einigen Quadratmetern bearbeitet. Diese Methode wurde für die vorliegende Arbeit an offenen Profilschnitten der Viereckschanzen von Papferding (Kapitel 5) und Fehmbach (Kapitel 6) und angewandt.

Die magnetischen Feldmessungen können durch die Entnahme von Bodenproben und deren laboranalytische gesteinsmagnetische Untersuchung ergänzt werden, wie es in dieser Arbeit bei den Viereckschanzen von Laibstadt (Kapitel 7), Papferding und Fehmbach durchgeführt wurde.

2.3.2. Grundlagen des Gesteinsmagnetismus

2.3.2.1. Einführung

Als einführende Literatur zu den magnetischen Eigenschaften von Materie im Allgemeinen sei JILES [1998] genannt. Gesteinsmagnetismus wird ausführlich in DUNLOP & ÖZDEMİR [1997] behandelt, CORNELL & SCHWERTMANN [2003] befassen sich mit verschiedensten laboranalytischen Untersuchungsmethoden an Eisenoxiden. ANGHEHEISTER & SOFFEL [1971], SOFFEL [1991] sowie TAUXE ET AL. [2009] zeigen Anwendungen gesteinsmagnetischer Messungen in Paläo- und Archäomagnetismus. THOMPSON & OLDFIELD [1986] sowie EVANS & HELLER [2003] behandeln das relativ neue Forschungsfeld des „environmental magnetism“, zu denen auch die Untersuchung der magnetischen Eigenschaften von archäologischen und anderen Böden zählt.

Grundsätzlich haben gesteinsmagnetische Untersuchungen das Ziel, Aussagen über

- die Art
- die Konzentration
- die Korngrößenverteilung

magnetischer Minerale zu treffen, um damit letztlich Rückschlüsse auf Bildungsbedingungen dieser Mineralkomponenten und ihre Änderungen in kleinräumig unterschiedlichen Bodenbereichen zu ziehen.

Die elementaren Grundprinzipien gesteinsmagnetischer Größen und Untersuchungsformen sollen zum Verständnis der folgenden Kapitel an dieser Stelle kurz umrissen werden.

2.3.2.2. Arten des Magnetismus in Materie

Diamagnetismus

Bewegte elektrische Ladungen erzeugen ein Magnetfeld. Die elementarsten Ladungen sind die Elektronen der Atome, d. h. der Bausteine jeglicher Materie. Elektronen bewegen sich auf Bahnen um ihre Atomkerne und rotieren zusätzlich um sich selbst (*spin*). Aus diesen Bewegungen resultieren die elementaren magnetischen Bahn- und Spinmomente der Elektronen. Heben sich die einzelnen magnetischen Momente aller Elektronen eines Atoms bzw. Materials gegenseitig auf, so ist nach außen hin keine Magnetisierung feststellbar, das Material ist diamagnetisch. Gold, Silber und Kupfer, aber auch Wasser und Quarz sind Beispiele

für diamagnetische Stoffe; Probenhalter für gesteinsmagnetische Messungen werden daher oft aus Quarz hergestellt.

Bei einem von außen angelegten Magnetfeld wird in diamagnetischen Stoffen gemäß der Lenzschen Regel eine diesem Feld entgegengesetzt gerichtete Magnetisierung induziert, daher ist ihre Suszeptibilität (siehe Kap. 2.3.2.4.) negativ; sie ist zudem temperaturunabhängig.

Paramagnetismus

Paramagnetismus kann nur auftreten, wenn im Material ungepaarte Elektronen auftreten, deren magnetische Momente sich nicht vollständig gegenseitig kompensieren. Die Momente können sich in einem äußeren magnetischen Feld teilweise entlang des Feldes ausrichten, sind aber voneinander unabhängig (Abb. 2.1.a). Ihre Suszeptibilität ist schwach positiv und nimmt mit steigender Temperatur ab.

Die meisten im Boden vorkommenden Eisenoxide sind paramagnetisch. Da diese keine Remanenz (siehe Kap. 2.3.2.4) tragen können, tragen sie nur zur induzierten Magnetisierung bei.

Ferro-, Antiferro- und Ferrimagnetismus

Bei den ferromagnetischen Mineralen Eisen, Nickel und Kobalt treten die unkompenzierten magnetischen Momente der Atomelektronen stark miteinander in Wechselwirkung, sie richten sich parallel zueinander aus (Abb. 2.1.b). Beim Antiferromagnetismus dagegen sind die magnetischen Momente jeweils paarweise antiparallel ausgerichtet (Abb. 2.1.c). Ungleich große, antiparallel liegende magnetische Momente oder ihre Verkipfung entlang bestimmter Kristallebenen führen zu verschiedenen Formen des Ferrimagnetismus (Abb. 2.1.d, 2.1.e).

Oberhalb der sogenannten Curietemperatur geht die parallele Ausrichtung der magnetischen Momente verloren, da die thermische Agitation dann gegenüber der magnetischen Wechselwirkung überwiegt. Erst mit dem Abkühlen unter diese jeweils materialabhängige Curietemperatur richten sich die magnetischen Einzelmomente wieder am bestehenden äußeren Magnetfeld aus; dieser Prozess führt z. B. bei erkaltender Lava zu einer einheitlichen, am Erdmagnetfeld ausgerichteten Magnetisierung des entstehenden Gesteinskomplexes (siehe auch Abschnitt 2.3.2.4., remanente Magnetisierung).

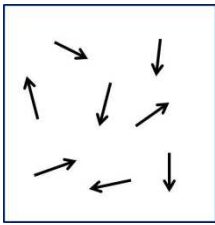
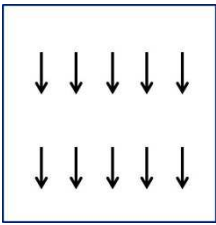
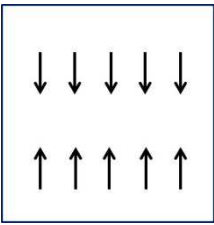
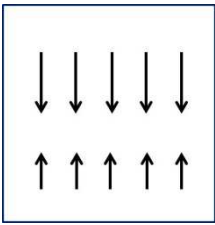
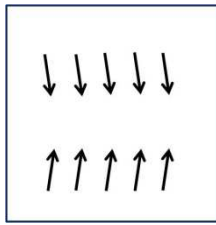
				
a) Paramagnetismus	b) Ferromagnetismus	c) Antiferromagnetismus	d) Ferrimagnetismus	e) Ferrimagnetismus (Spin canting)

Abb. 2.1.: Symbolische Darstellung der magnetischen Momente der Atomelektronen bei verschiedenen Arten des Magnetismus. Nach SOFFEL [1991].

2.3.2.3. Domänenstruktur

Sind alle magnetischen Momente eines Minerals parallel zueinander ausgerichtet, so spricht man von der magnetischen *Sättigung* der Probe. Wegen des Prinzips der Energieminimierung innerhalb einer Mineralkomponente können die magnetischen Momente je nach Größe des Minerals jedoch im Normalfall nicht durchgehend parallel ausgerichtet werden bzw. bleiben. Bei genügend großen Körnern bilden sich Zonen entgegengesetzt gerichteter Magnetisierung heraus, die sogenannten Weißschen Bezirke mit den zwischen ihnen liegenden Blochschen Wänden; siehe SOFFEL [1991] mit detaillierten mikroskopischen Aufnahmen.

Die Korngrößen- bzw. magnetische Bereichsstruktur der Minerale lässt sich aufteilen in

- SP-Teilchen (superparamagnetisch)
- SD- Teilchen (single domain / Einbereichsteilchen)
- PSD-Teilchen (pseudo single domain, mit 2 bis ca.10 Weißschen Bezirken)
- MD-Teilchen (multi domain / Mehrbereichsteilchen)

Im Boden ist üblicherweise eine Mischung verschiedener Korngrößen anzutreffen. Diese können durch geeignete gesteinsmagnetische Untersuchungen wie z. B. Entmagnetisierung der Probe im magnetischen Wechselfeld (Lowrie-Fuller-Test, LOWRIE & FULLER [1971]) oder anhand ihrer Hystereseeigenschaften („Day-Plot“, DAY ET AL. [1977], DUNLOP [2002]) differenziert werden.

Generell tragen SD-Teilchen eine stabilere Remanenz als PSD- und MD-Teilchen. Daher liegen etwa biogen gebildete Fe_3O_4 -Magnetosome vor allem im SD-Bereich, was bei Magnetit Korngrößen von rund 10-100 Nm entspricht. Auch in situ im Boden neu gebildete Minerale liegen im SD- oder SP-Bereich. Bei Feuer bzw. Erhitzung entstehen vor allem Partikel im SP-Bereich (JORDANOVA ET AL. [2001]). Größere Korngrößen mit MD-Teilchen finden sich vor allem in frisch verwittertem Gestein, in äolisch herbeigeführten frischen Löss- und Sand-Ablagerungen oder auch in der Nähe eisenverarbeitender Industrieanlagen mit einer deutlichen Beimengung an Magnetit im MD-Bereich.

2.3.2.4. Induzierte und remanente Magnetisierung

Eine induzierte Magnetisierung ist nur so lange in der Probe vorhanden, wie ein äußeres Magnetfeld angelegt ist; bei Abschalten des Feldes verschwindet sie wieder. Dia- und paramagnetische Stoffe können nur eine induzierte Magnetisierung tragen. Bei ferro- und ferrimagnetischen Materialien dagegen bleibt nach dem Abschalten des Magnetfeldes ein remanenter Magnetisierungsanteil (*Remanenz*) in der Probe erhalten.

Im Hinblick auf magnetometrische Untersuchungen archäologischer Befunde ist festzuhalten, dass das magnetische Erdfeld ständig eine induzierte Magnetisierung im Boden hervorruft, deren Stärke jeweils von den Materialeigenschaften der am Ort vorhandenen Eisenoxide bestimmt wird. Zusätzlich kann, je nach der Art der Eisenminerale und ihrer Bildungsbedingungen und Korngrößen, auch eine remanente Magnetisierung im Boden vorliegen, deren Richtung von der der induzierten Magnetisierung durchaus auch abweichen kann.

NRM	natürliche remanente Magnetisierung (allgemein), kann Anteile aus TRM, DRM, CRM etc. enthalten
TRM	Thermoremanente Magnetisierung; entsteht beispielsweise bei Abkühlen von Lava unter die Curie-Temperatur
IRM	Isothermale remanente Magnetisierung. Erworben bei einer gleichbleibenden Temperatur, z. B. bei Laborexperimenten (Feldstärke einige Tesla für weniger als 1 Sekunde)
SIRM	Isothermale remanente Magnetisierung unter Einfluss eines Magnetfeldes, das stark genug ist, um eine Sättigung der Probe zu erreichen
ARM	Anhysteretische remanente Magnetisierung: Einem magnetischen Wechselfeld abnehmender Stärke (Entmagnetisierungseffekt) wird ein schwaches magnetisches Gleichfeld überlagert
DRM	Sedimentationsremanenz: Bei Absinken mikroskopischer Schwebstoffe im Wasser werden diese entsprechend ihres magnetischen Moments entlang des magnetischen Erdfeldes ausgerichtet
CRM	Chemische remanente Magnetisierung, z. B. bei chemischer Umwandlung von paramagnetischen in ferrimagnetische Minerale

Tab. 2.4.: Arten der remanenten Magnetisierung von Stoffen. Gekürzt nach SOFFEL [1991].

Remanente Magnetisierung

Tabelle 2.4. führt verschiedene Arten der remanenten Magnetisierung auf, die im natürlichen Gestein oder bei der Bodenbildung auftreten können, und / oder die laboranalytische Untersuchungsgrößen darstellen.

Induzierte Magnetisierung

Am Messort bzw. am Probenmaterial wird kurzzeitig ein externes Magnetfeld H angelegt, wodurch in der Probe eine Magnetisierung M hervorgerufen wird. Damit kann die materialtypische magnetische Suszeptibilität bestimmt werden. Gebräuchlich sind dabei die Größen Volumensuszeptibilität κ sowie, unter Berücksichtigung der Dichte des Materials, die Massensuszeptibilität χ .

$$\kappa = M/H$$

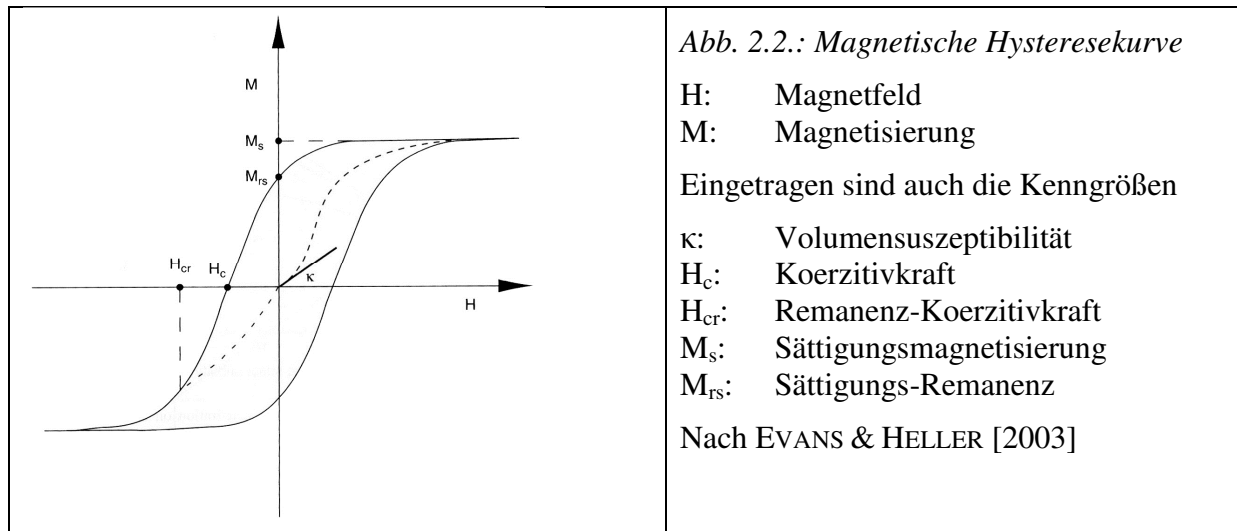
κ : Volumensuszeptibilität, dimensionslos []
 M : Magnetisierung [A/m]
 H : äußeres Magnetfeld [A/m]

$$\chi = \kappa/\rho$$

χ : Massensuszeptibilität [m^3/kg]
 ρ : Dichte des Materials [kg/m^3]

Paramagnetische Proben erreichen ihre Sättigung, d. h. die parallele Ausrichtung sämtlicher magnetischer Momente des Materials, erst bei extrem hohen Feldstärken von mehreren Tesla, die in der gesteinsmagnetischen Laborpraxis kaum erreicht werden können; zudem nimmt das Material keine remanente Magnetisierung an. Im Experiment besteht daher praktisch durchgehend ein linearer Zusammenhang zwischen der Magnetisierung M und dem erzeugenden Magnetfeld H .

Bei ferro- und ferrimagnetischen Stoffen dagegen treten partielle oder vollständige Sättigungseffekte schon bei niedrigeren Feldstärken auf, und beim Rückgang des Feldes verbleibt eine Remanenz in der Probe. Daher ist der lineare Zusammenhang zwischen M und H nur im Bereich der Anfangssuszeptibilität gegeben, bei höheren Feldstärken bildet sich die typische Hysteresekurve heraus.



2.3.2.5. Wichtige Eisenminerale und ihre Eigenschaften

Dieser Überblick ist gekürzt nach den ausführlichen Darstellungen in CORNELL & SCHWERTMANN [2003], EVANS & HELLER [2003], SOFFEL [1991] sowie FABBINDER [1994].

Eisen tritt im Boden nicht in elementarer Form auf, da sich aufgrund des hohen Sauerstoffgehaltes der Umgebung bei der verwitterungsbedingten Freisetzung aus dem Gestein üblicherweise Eisenoxide bilden. Das Eisen liegt in diesen primären Verbindungen zunächst meist in dreiwertiger Form (Fe^{3+}) vor; Ausnahmen bilden FeO , $\text{Fe}(\text{OH})_2$ und Fe_3O_4 .

Reduzierende Bedingungen in anaeroben Zonen bewirken Auflösung der primären Oxide und Bildung von Fe^{2+} . Das gelöste Fe^{2+} ist mobil. Tritt es dann im Boden wiederum in Zonen mit oxidierenden Umgebungsbedingungen ein, fällt es erneut aus und geht als Fe^{3+} neue stabile immobile Verbindungen ein.

Gesteinskomponenten mit zweiwertigem Eisen, wie Olivin oder Pyroxen, zeigen dabei meist eine grünliche oder grau-schwarze Färbung, während dreiwertiges Eisen wie z. B. in Goethit oder Hämatit den Boden gelblich, rötlich oder braun färbt.

Magnetit, Fe_3O_4 , ist ein schwarzes ferrimagnetisches Mineral, welches sowohl Fe^{2+} als auch Fe^{3+} enthält. Es kommt sowohl in magmatischem und metamorphem Gestein als auch in Sedimentgesteinen vor, ist ein bedeutendes Eisenerz („Magnetisenerz“) und sehr wichtig für paläomagnetische Untersuchungen. Zudem wird es auch unter Beteiligung von Bakterien gebildet (s. Kap. 2.3.3.1.)

Zum Nachweis von Magnetit wird vor allem die Curietemperatur von 580°C oder der Verwey-Übergang herangezogen; letzterer ist ein Richtungswechsel der spontanen Magnetisierung bei 119 K verbunden mit einer Änderung ihrer Intensität.

Eine teilweise Substitution des Fe durch Ti ist möglich (Titanomagnetit; Mischreihe Magnetit \leftrightarrow Ulvöspinell, Fe_2TiO_4), was zu einer Abnahme der spontanen Magnetisierung und der Curietemperatur führt.

Maghemit, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, ist schwarz mit rotbraunem „Strich“ (Abrieb) und in Böden ein Verwitterungsprodukt von Magnetit, mit dem er sich die inverse kubische Spinellstruktur teilt; zwischen beiden Mineralen besteht eine lückenlose Mischreihe durch zunehmende Substitution der Fe^{2+} -Ionen des Magnetit durch Fe^{3+} . Es bildet sich auch bei der Erhitzung anderer Eisenoxide, dann vor allem in der Gegenwart organischer Materie durch Reduktionseffekte. Maghemit selbst wandelt sich oberhalb von etwa 400°C in Hämatit um.

Goethit, α -FeOOH, ist im Muttergestein und in den verschiedensten Bodenbereichen sehr häufig zu finden. Es ist eines der stabilsten Eisenoxide und wird entweder als erstes Eisenoxid geformt oder bildet den Endpunkt verschiedener Verwitterungsvorgänge und Transformationsreihen. Im kristallisierten Zustand ist es dunkelbraun oder schwarz, aber gelblich in Bodensystemen, welchen es die charakteristische Ockerfarbe verleiht.

Hämatit, α -Fe₂O₃, ist vor allem in Gesteinen und in tropischen Böden ebenfalls sehr häufig vertreten. In kristalliner Form ist es glänzend schwarz-grau, fein verteilt aber blutrot. Es ist sehr stabil und bildet ein häufiges Endprodukt von Transformationen, z. B. auch bei Verwitterungsvorgängen von Magnetit. Titanohämatite bilden die Mischreihe zwischen Hämatit und Ilmenit (FeTiO₃); der steigende Titangehalt führt zur linearen Absenkung der Curie-temperatur von 675°C bis unter -200°C.

Hämatit zeigt ebenso wie Magnetit einen Phasenübergang mit Wechsel der spontanen Magnetisierungsrichtung, den sog. Morin-Übergang bei 263 K.

Lepidokrokit, γ -FeOOH, ist deutlich orange gefärbt. Es tritt im Gestein, in Böden und Rost auf und ist häufig ein Oxidationsprodukt des Fe²⁺. In B-Horizonten reduktomorpher Böden bildet es die typische rostfarbene Fleckung.

Ferrihydrit ist ein Fe³⁺-Hydroxid. Es tritt in Bodengesellschaften unter verschiedenen chemischen Zusammensetzungen, z. B. als Fe₅O₈H • H₂O, häufig auf, aber nur in Form von Nanokristallen. Im Lauf der Zeit transformiert es sich in stabilere und besser kristallisierte Eisenoxide und bildet damit einen wichtigen Vorläufer derselben. Es ist rötlich-braun gefärbt.

Siderit, FeCO₃, kommt in karbonatreichen Sedimenten durch Ausfällung in mariner oder limnischer Umgebung vor, auch als Raseneisenerz. Siderit ist paramagnetisch, kann aber zu Magnetit, Maghemit und Hämatit oxidiert werden, die dann eine chemische Remanenz CRM tragen können.

Die Minerale Lepidokrokit, Ferrihydrit und Siderit sind bei Normaltemperatur zwar paramagnetisch und tragen keine Remanenz. Bei Erhitzungsprozessen unter Laborbedingungen finden allerdings chemische Umwandlungen in ferrimagnetische Eisenoxide statt (s. Kapitel 5 / Papferding, Kapitel 7 / Laibstadt), was eine indirekte magnetometrische Nachweisbarkeit bedingt.







					
Magnetit	Maghemit	Hämatit	Lepidokrokit	Goethit	Ferrihydrit

Abb. 2.3.: Angenäherte Farben der wichtigsten Bodeneisenoxide. Nach CORNELL & SCHWERTMANN [2003].

Bei schwefelhaltigen Ausgangssubstraten und anaeroben Umgebungsbedingungen ist auch die Bildung von Eisensulfiden möglich, vermutlich unter Beteiligung schwefelreduzierender Bakterien. Obwohl sie wegen der eingeschränkten Bildungsbedingungen selten anzutreffen sind, tragen sie dann doch deutlich zur Gesamtmagnetisierung des Bodens bei.

Greigit, Fe_3S_4 , stellt von der Kristallstruktur her das Schwefelanalogon zu Magnetit dar und ist ebenso wie dieser relativ stark ferrimagnetisch. Es findet sich in feinen schwarzen Kristallen der Größe 5-50 nm.

Pyrrhotit ist ferrimagnetisch und extrem selten in jungen Sedimenten anzutreffen, wohl aber in basischen bis ultrabasischen Magmatiten und Metamorphiten. Es zeigt eine Phasenumwandlung bei 34 K.

Die magnetischen Eigenschaften der für die Gesteinsmagnetik wichtigsten Eisenminerale sind in Tabelle 2.5. zusammengestellt.

Mineral	Chemische Formel	Art des Magnetismus	Curietemp. T_c , Néel-Temp. [°C]	Sättigungsmagnetis. M_s [kA/m]	Sättigungsremanenz M_{RS} [kA/m]	Koerzitivkraft H_C [mT]	Remanenz-Koerzitivkraft H_{CR} [mT]	Spez. Suszeptibilität [$10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$]
Magnetit	Fe_3O_4	Ferrimag.	580	480	5 - 250	2 - 10	15 - 55	$10^6 - 10^7$
Maghemit	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Ferrimag.	590-675	380	5 - 40	10	15 - 33	$10^5 - 10^7$
Hämatit	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Spin canting	675	1 - 2,5	0,4	400	700	$10^2 - 10^3$
Goethit	$\alpha\text{-FeOOH}$	Antiferromag.	90 - 120	≈ 2	?	3000 - 5000	?	10^3
Lepidokrokit	$\gamma\text{-FeOOH}$	Paramag. (über Néel-Temp.)	-196	---	---	---	---	
Ferrihydrit	$5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	Paramag.		---	---	---	---	
Siderit	FeCO_3	Paramag.		---	---	---	---	
Greigit	Fe_3S_4	Ferrimag.	$\approx 270 - 330$	≈ 130				10^3
Pyrrhotit	Fe_7S_8 , Fe_9S_{10}	Ferrimag., antiferromag.	320	≈ 80				$10^3 - 10^5$

Tab. 2.5.: Magnetische Eigenschaften der wichtigsten Eisenoxide und –sulfide. Nach SOFFEL [1991], FAßBINDER [1994] und EVANS & HELLER [2003].

2.3.3. Anwendungen des Gesteinsmagnetismus auf Bodenuntersuchungen

In den letzten Jahrzehnten hat sich der Arbeitsbereich „environmental magnetism“ etabliert, in dem gesteinsmagnetische Untersuchungsmethoden auf umweltrelevante und bodenkundliche Fragestellungen Anwendung finden. Hier soll ein knapper Überblick über die Bandbreite der Themen gegeben werden.

2.3.3.1. Anreicherung ferro(i)magnetischer Minerale

Bereits in den 1950er Jahren stellte Eugène Le Borgne eine verstärkte magnetische Suszeptibilität des Oberbodens fest und konnte diesen Effekt weltweit, unabhängig von der

zugrunde liegenden Lithologie, bestätigen (LE BORGNE [1955]). Er führte die Anreicherung magnetischer Minerale auf reduzierende Umgebungsbedingungen durch nassen Boden oder die Einwirkung von Feuer zurück (LE BORGNE [1960]), was den ursprünglich vorhandenen Hämatit zu Magnetit und diesen bei einer nachfolgenden Oxidation zu Maghemit umbilden sollte. Dieser sogenannte Le Borgne-Effekt wurde für die archäologische Forschung aufgegriffen (TITE & MULLINS [1971]; MULLINS [1974]), indem die verstärkte Magnetisierung zurückgeführt wurde auf das ehemalige Vorhandensein von Ofenstellen, den Abbrand von Gebäuden etc. mit Verteilung der stärker magnetischen Ascheschichten im Oberboden.

Allerdings finden sich Anreicherungen mit magnetischen Mineralen, und hier insbesondere von Magnetit, auch in Bodenbereichen, in denen nicht von Einwirkung durch Feuer ausgegangen werden kann:

- Biotische oder abiotische Bildung durch von Bakterien hervorgerufene reduzierende Bedingungen in ansonsten sauerstoffreichen Bodenbereichen (MAHER & TAYLOR [1989]; LOVLEY ET AL. [1987])
- Nachweis von biogenem Magnetit und den sie erzeugenden Bodenbakterien in situ (FABBINDER ET AL. [1990], FABBINDER [1994], FABBINDER & STANJEK [1993])

MAHER [1986] befasste sich mit der Unterscheidung von Bodentypen durch magnetische Messungen. Bodenbildende Prozesse werden für die höheren magnetischen Suszeptibilitäten verantwortlich gemacht, hervorgerufen durch die Bildung von sehr feinkörnigem Maghemit und Magnetit (HELLER ET AL. [1991], MAHER & THOMPSON [1991]).

Nach DEARING ET AL. [1996] führte die abiotische Verwitterung primärer eisenhaltiger Minerale und biologische Fermentation zur Bildung von sehr feinkörniger Eisenoxide und Eisenhydroxide. Im Gegensatz dazu verneinten SINGER ET AL. [1996] biologische Einflüsse und argumentierten, dass sekundärer Magnetit und Maghemit direkt aus der Bodenlösung ausgefallen sei.

OCHES & BANERJEE [1996] stellten fest, dass der Grad der magnetischen Verstärkung stark abhängt von der Bodenbildungsrate und vom Bodentyp. In den am besten entwickelten Böden, die mit warmen und feuchten Interglazialzeiten korrelieren, sind die Suszeptibilitäts-Werte sehr niedrig. Vermutlich ist das meiste Eisen hier in antiferromagnetischen Mineralen wie Goethit, Lepidokrokit oder Hämatit gebunden. Auch HANESCH & SCHOLGER [2005] bestätigten den Zusammenhang zwischen Suszeptibilität und Bodentypus, sowie die Rolle des Ausgangsmaterials. MAHER ET AL. [2003] korrelieren die Bildung von Ferrimagnetika mit dem Klima bzw. der Häufigkeit von Regenfällen.

Die Ausprägung unterschiedlicher, positiver oder negativer Magnetometeranomalien am neolithischen Erdwerk von Riekofen war Gegenstand der Untersuchungen von SCHLEIFER [1998] und SCHLEIFER ET AL. [2003].

2.3.3.2. Lössabfolgen, Seesedimente und marine Sedimente

Wichtige Lössablagerungen finden sich global verteilt, vor allem in einem lückenhaften Gürtel von Zentraleuropa bis China, in Alaska, den USA (Mississippi) und Argentinien. Da manche Lössabfolgen wie z. B. an chinesischen Plateaus bis zu 300 Meter dicke Schichtabfolgen enthalten, lassen sich diese zur Rekonstruktion von Klimaschwankungen bis über die letzten 2,5 Mio. Jahre heranziehen: Während der Kaltzeiten überwiegt die Ablagerung von Lössschichten, während der Warmzeiten dann die Bodenbildung. Dabei ist meistens eine Verstärkung der Suszeptibilität während der Bodenbildungszeiten festzustellen; aber auch eine Abschwächung zu diesen Zeiten tritt auf.

KUKLA ET AL. [1988] und andere Publikationen korrelierten Suszeptibilitätswerte über Profile mit O^{18} - und Klimadaten. BEGÉT & HAWKINS [1989] untersuchten Lössablagerungen in Alaska und fanden eine erniedrigte Suszeptibilität in den Schichten der fossilen Böden (Paleosols), verglichen mit den Lössablagerungen. BANERJEE ET AL. [1997] vermuteten durch unterschiedliche Windverhältnisse hervorgerufene Korngrößenunterschiede der magnetischen Fraktionen von Löss und Bodenschichten.

Sedimente wurden nicht nur in aerischer Form als Löss betrachtet; auch marine und Seesedimente waren der Gegenstand von Untersuchungen. SNOWBALL [1993] befasste sich mit Seesedimenten und Bodenprofilen in Schweden. Er vermutete Ursachen der magnetischen Variationen in glazialer Aktivität, Bodenentwicklung und Auflösung magnetischer Minerale während klimatischer Verbesserung. ROBINSON [1986] korrelierte Suszeptibilitäts- und IRM-Werte von Sediment-Bohrkernen aus dem Nordatlantik mit ^{18}O -Daten und paläoklimatischen Variationen. BLOEMENDAL ET AL. [1993] fanden den Zusammenhang zwischen gesteinsmagnetischen Eigenschaften von Sedimentproben und ihrem Staubgehalt. Nach PETERSEN ET AL. [1986] bestimmen magnetotaktische Bakterien die magnetischen Eigenschaften bestimmter Ozeansedimente. PETERMANN & BLEIL [1993] fanden lebende magnetotaktische Bakterien in pelagischen und hemipelagischen Sedimenten des Südatlantik.

2.3.3.3. Zusammenhang von Bodenverschmutzung und magnetischen Mineralen

JELENSKA ET AL. [2004] und JELENSKA ET AL. [2008] untersuchten drei durch Eisenerzabbau und –verarbeitung belastete Standorte sowie einem unbelasteten Standort in der Ukraine. Der Zusammenhang zwischen magnetischer Suszeptibilität und Schwermetallbelastung im Oberboden durch die Bildung von grobkörnigem Magnetit und Hämatit konnte bestätigt werden, aber Auswirkungen durch feinkörnige ferri- und antiferromagnetische Minerale sind auch in einer Tiefe bis 120 cm zu erkennen. Auch nach HEMETSBERGER & SCHOLGER [2006] führt Verschmutzung zu erhöhter Suszeptibilität im Oberboden. Diese Effekte müssen auch bei der Interpretation der magnetischen Anomalien von Bodendenkmälern beachtet werden.

Der Zusammenhang zwischen magnetischer Suszeptibilität und Schwermetallbelastung wurde auch untersucht von HOFFMANN ET AL. [1999], HANESCH & SCHOLGER [2002], HANESCH ET AL. [2003] und BOYKO ET AL. [2004]. Weitere Studien befassen sich mit der magnetischen Analyse von Schwermetallbelastungen an Blattoberflächen straßennaher Bäume, z. B. MAHER ET AL. [2008], oder der Einbeziehung der Innenräume von Gebäuden (HALSALL ET AL. [2008]).

2.3.3.4. Untersuchungsmethoden

Eine weitere Gruppe von Publikationen befasst sich mit gesteinsmagnetischen Untersuchungsmethoden mit Relevanz für Bodenproben und chemische Veränderungen auch nach thermischer Behandlung. Genannt seien hier als Beispiele folgende Aufsätze: HANESCH ET AL. [2006] untersuchten den Einfluss organischen Kohlenstoffs auf chemische Probenveränderungen bei thermomagnetischen Messungen. DEKKERS [1990] betrachtete die Bildung ferrimagnetischer Minerale durch Erhitzen von Goethit. DE BOER & DEKKERS [1998] befassten sich mit dem korngrößenabhängigen Verhalten von Hämatit und Goethit bei Erhitzung. EGLI [2003] gelang die Unterscheidung verschiedener Bildungszyklen von magnetischen Mineralen an einem Seeprofil.

Kapitel 3. Ergebnisse der Magnetometerprospektionen im Hinblick auf magnetische Anomalientypen

3.1. Auswahl und Lage der Untersuchungsflächen

Für die vorliegende Arbeit wurden zwölf Prospektionen an Viereckschanzen neu durchgeführt. Als Auswahlkriterium diene vor allem die breite Streuung unterschiedlicher geologischer Lagen und Bodentypen.

Diese Prospektionen wurden bis auf wenige Ausnahmen von der Verfasserin selbst geplant und ausgeführt.

Orte und Auswahlkriterien der Messflächen:

- Die für die ersten Messungen ausgewählten Viereckschanzen sind drei Anlagen aus der sogenannten Erdinger Gruppe, einer lokalen Anhäufung von mehreren verebneten sowie obertägig erhaltenen Schanzen (IRLINGER [1996B]), im Einzelnen: Teufstetten, Reithofen und Papferding. Interessant war hierbei die Fragestellung, ob sich bei benachbarten Anlagen auf ähnlichen Böden auch vergleichbare magnetische Anomalien herausbilden. Bei den Böden handelt es sich um nacheiszeitliche Braunerden und Pseudogleye auf Lösslehm und Moränenuntergrund. Später wurden diese Prospektionen ergänzt um die Anlage von Loipfing.
- Mit Deisenhofen 3 (Bezeichnung nach SCHWARZ [1959]) wurde eine sehr gut erhaltene obertägige Schanze in Waldlage ausgewählt, die aufgrund des hochstämmigen Fichtenbewuchses mit nur wenig störendem Unterholz dennoch relativ gute Arbeitsbedingungen ermöglichte.
- Die Schanze von Manndorf in Niederbayern ließ mit ihrer Lage auf Lössboden gute Ergebnisse erwarten.
- Mit Feldmoching und Aubing standen in der Münchner Schotterebene zwei Anlagen auf kiesigem Untergrund zur Verfügung.
- Auch die Schanze von Fehmbach liegt auf tiefgründigem Kiesboden, welcher für den wirtschaftlichen Abbau freigegeben war. Die damit verbundene Grabung ermöglichte optimale Einblicke in die unteren Bodenschichten sowie eine Probennahme.
- Bei der Viereckschanze von Laibstadt handelt es sich um eine obertägig sehr gut erhaltene, aber dennoch bislang unerforschte Anlage auf schwerem Lehm Boden aus Juratonen.
- Hechendorf-Güntering ist eine erst vor wenigen Jahren entdeckte Schanze. Den Boden bilden Braunerden über einer würmeiszeitlichen Moräne. Der archäologische Gesichtspunkt spielte wegen der hier „fehlenden Ecke“ eine wichtige Rolle.
- Auf dem Kalkgleyboden im Donaumoos bei Manching wurden früher schon einige wenig aussagekräftige Prospektionen durchgeführt, dies sollte hier bei einer Viereckschanze noch einmal überprüft werden.

Auch die in den Jahren 1982-2004 durchgeführten 15 Prospektionen durch Dr. Becker und PD Dr. Faßbinder wurden von der Verfasserin zum Teil erstmals komplett bearbeitet oder neu ausgewertet und mit ihren Ergebnissen in diese Arbeit integriert.

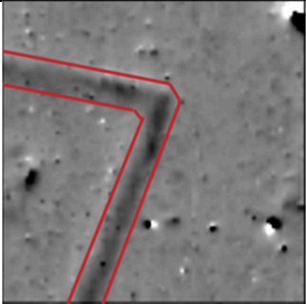
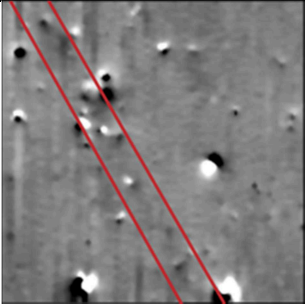
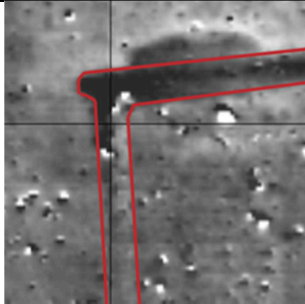
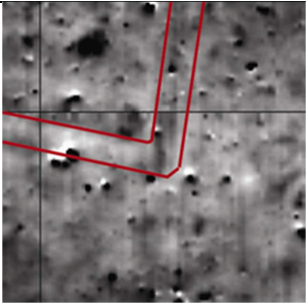
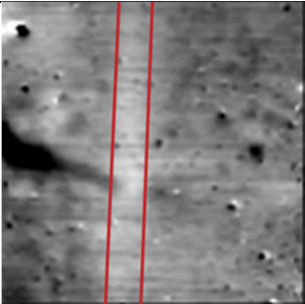
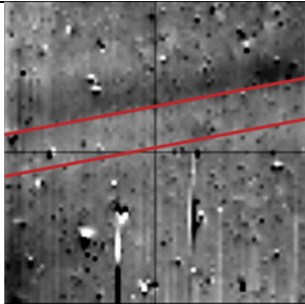
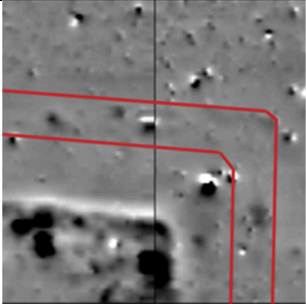
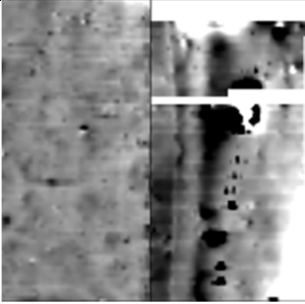
Ein Gesamtüberblick über die Prospektionen jeweils mit Luftbild, Magnetogramm und Interpretationsplan sowie Informationen über Lage, Geologie, Boden und Geländeform (einschließlich Literaturangaben zu jeder der aufgeführten Anlagen) findet sich in Katalogform

im Anhang dieser Arbeit. Die laufenden Nummern dienen der leichteren Bezeichnung der einzelnen Anlagen und werden nur in der vorliegenden Arbeit verwendet.

3.2. Magnetometrische Nachweisbarkeit der Gräben von Viereckschanzen

3.2.1. Überblick: Unterschiedliche magnetische Anomalien der Viereckschanzengräben

Als erstes soll die magnetometrische Nachweisbarkeit der Gräben von Viereckschanzen anhand unterschiedlicher Typen von Anomalien betrachtet werden, siehe Abb. 3.1. sowie Kapitel 3.2.2 mit 3.2.10.

		
Typ A: Deutlich erkennbare positive Anomalie Bsp. Hechendorf-Güntering	Typ B: Schwach erkennbare positive Anomalie Bsp. Teufstetten	Typ C: Wechsel zwischen deutlicher und schwacher positiver Anomalie Bsp. Baisweil
		
Typ D: Wechsel zwischen positiver und negativer Anomalie Bsp. Fehmbach	Typ E: Deutlich erkennbare negative Anomalie Bsp. Beuren	Typ F: Schwach erkennbare negative Anomalie Bsp. Plattling-Pankofen
		Abb. 3.1.: Ausschnitte aus den Grabenbereichen von Magnetogrammen der untersuchten Viereckschanzen, je 40x40 Meter.
Typ G: Keine Anomalie im Grabenbereich erkennbar Bsp. Laibstadt	Typ H: Keine Aussage über Anomalie im Graben möglich Bsp. Eybburg	

Im Folgenden soll versucht werden, die Beobachtungen mit den Charakteristika der einzelnen Schanzen zu korrelieren. Hierbei werden auch der Erhaltungszustand der Anlage sowie die im Magnetogramm erkannten Anomalien der Bebauungsstrukturen mit einbezogen.

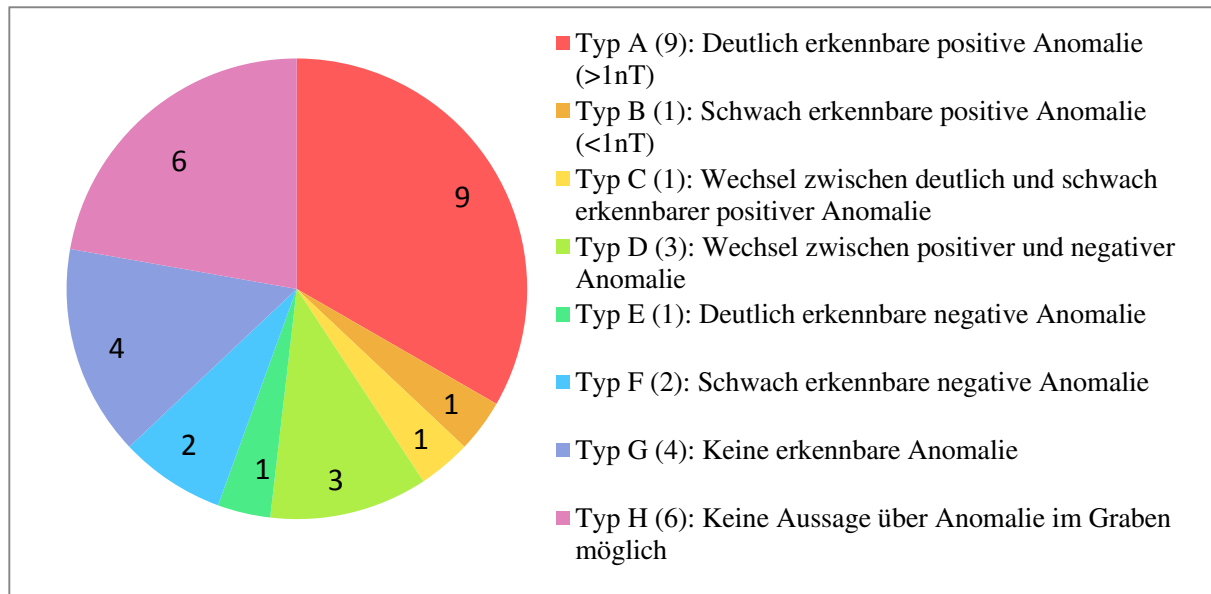


Abb. 3.2.: Häufigkeit der Anomalietypen in absoluten Zahlen

3.2.2. Grabenanomalie Typ A: Deutlich erkennbare positive Anomalie

Weiltingen (im Anhang: Nr. 3)

Boden: Schwerer bis toniger Lehm über Juratonen. Trockenes Gelände.
 Erhaltung: Graben verfüllt, Wall bis 2,2 m Höhe erhalten.
 Bemerkung: Bebauungsstrukturen sehr gut erkennbar, vermutlich Brandeinwirkung. Eventuell auch Brandschuttfüllung im Graben, jedoch auffällig gleichmäßig verteilt.

Hechendorf- Güntering (Nr. 6)

Boden: Parabraunerden und Braunerden über schluffig-kiesiger Jungmoräne.
 Erhaltung: Anlage völlig verebnet.
 Bemerkung: Tiefere Grubenstrukturen erkennbar, aber keine Gebäude, vermutlich wegen Erosion der Bebauungsschicht.

Egweil (Nr. 7)

Boden: Braunerden aus kiesig-lehmigem und sandigem Molassematerial.
 Erhaltung: Anlage völlig verebnet.
 Bemerkung: Bebauungsstrukturen sehr gut erkennbar.

Feldmoching (Nr. 12)

Boden: Ackerpararendzinen aus carbonatreichem würmzeitlichen Schotter.
 Erhaltung: Anlage völlig verebnet.
 Bemerkung: Gebäudepfostenspuren und insbesondere tiefere Grubenstrukturen sehr gut erkennbar.

Deisenhofen Schanze 1 (Nr. 15)

- Boden: Braunerde und Parabraunerde aus carbonatreichem würmzeitlichem Schotter; sandiger Lehm. Trockenes Gelände.
- Erhaltung: Nord- und Südwall erhalten, Ost- und Westwall abgegraben. Nordgraben noch Tiefe bis 1,5 m, andere Gräben nur noch als schwache Mulde erkennbar. Wallmaterial: Kies. Dieser bildet vermutlich auch das Füllmaterial der Gräben.
- Bemerkung: Gebäudepfostenspuren sehr gut erkennbar.
Zu Besonderheiten (extrem hohe Anomaliewerte) siehe Punkt 3.3.6.

Maxing (Nr. 20)

- Boden: Braunerde und Parabraunerde aus carbonatreichem Schotter; geröllhaltiger, sandiger Lehm. Trockenes Ackerland.
- Erhaltung: Zum Zeitpunkt der Prospektion fast völlig verebnet. Jetzt teilweise überbaut.
- Bemerkung: Bebauungsstrukturen sehr gut erkennbar.

Oberhaimbuch (Nr. 22)

- Boden: Sand und Lehm über Kies der Donauhochterrasse.
- Erhaltung: Verebnet.
- Bemerkung: Bebauungsstrukturen sehr gut erkennbar. Die positiven magnetischen Anomalien sowohl des Grabens als auch von Bau- und Grubenstrukturen werden nach Norden hin, folgend einer sehr leichten Hangneigung, schwächer, was auf Erosionsprozesse des Oberbodens schließen lässt.

Oberframmering (Nr. 24)

- Boden: Pararendzina aus Löss und Lösslehm
- Erhaltung: Verebnet.
- Bemerkung: Wie bei Oberhaimbuch sind die Bebauungsstrukturen sehr gut erkennbar. Die positiven magnetischen Anomalien werden auch hier nach Norden hin, folgend der Hangneigung, schwächer, was auf Erosionsprozesse des Oberbodens schließen lässt.
Wasserzulauf zum Graben von Süden her.
Bemerkenswert ist die starke Ausprägung des zu einer linearen positiven Anomalie gehörende Minimum im Norden („magnetischer Schatten“) entlang des Nord- und Südgrabens, die sonst eher bei punktförmigen Anomalien in Erscheinung tritt und die hier nicht als Ausdruck bodengeprägter Eisenoxidveränderungen interpretiert werden darf.

Manndorf (Nr. 27)

- Boden: Parabraunerde und Braunerde aus Löss und Lösslehm
- Erhaltung: Verebnet
- Bemerkung: Die Grabenspur zeigt sich schmal, aber gut erkennbar. Hausgrundrisse sind, anders als erwartet, nicht zu erkennen, wohl aber einige vermutlich tiefere Grubenstrukturen. Daher ist anzunehmen, dass die latènezeitlichen oberen Bodenschichten bereits tiefgründig erodiert sind und nur noch die untere Grabenspitze und die tiefer liegenden Befunde im Boden erhalten sind.

3.2.3. Grabenanomalie Typ B: Schwach erkennbare positive Anomalie

Teufstetten (Nr. 16)

Boden: Braunerde-Pseudogley und Pseudogley aus Lösslehm über Altmoräne.
Erhaltung: Nahezu völlig verebnet.
Bemerkung: Kaum erkennbare Bebauungsspuren.

3.2.4. Grabenanomalie Typ C: Wechsel zwischen deutlich und schwach erkennbarer positiver Anomalie

Baisweil (Nr. 2)

Boden: Sandiger Lehm aus Kies und Moränenmaterial.
Erhaltung: Verebnet.
Bemerkung: Bebauungsstrukturen gut erkennbar.
Der Wechsel zwischen deutlicher und kaum erkennbarer positiver Anomalie erfolgt an der nordwestlichen Ecke der Viereckschanze, sodass Unterschiede entweder im Zeitpunkt oder aber im Verfüllungsmaterial der unterschiedlichen Grabenbereiche naheliegen. Vgl. die Anlagen von Oberhaimbuch und Oberframming.

3.2.5. Grabenanomalie Typ D: Wechsel zwischen positiver und negativer Anomalie

Papferding (Nr. 18)

Boden: Pseudogley-Braunerde und Braunerde aus mehrere Meter mächtigem Lösslehm über Altmoräne.
Erhaltung: In den letzten Jahrzehnten nahezu völlig verebnet.
Bemerkung: Bebauungsstrukturen sind nur sehr schwach erkennbar.
Siehe auch Kapitel 5 (Papferding) zur näheren Untersuchung der Anlage.

Pfeffenhausen (Nr. 23)

Boden: Parabraunerde und Braunerde aus Lösslehm.
Erhaltung: Völlig verebnet.
Bemerkung: Das Magnetogramm zeigt eine auffällige Diskrepanz zwischen sehr guter und sehr schlechter Erhaltung der Befundsituation. Der Wechsel verläuft entlang einer Flurgrenze, daher ist von unterschiedlichen landwirtschaftlichen Bebauungsmethoden in den beiden Bereichen auszugehen (Tiefpflügen im östlichen zerstörten Bereich?) - Gebäudestrukturen sind im besser erhaltenen Westteil der Schanze sehr gut erhalten, aber auch im Ostteil noch zu erkennen.

Fehmbach (Nr. 25)

Boden: Sandiger Lehm auf würmzeitlichem Schotter, Donauhochterrasse.
Erhaltung: Verebnet.
Bemerkung: Bebauungs- und Grubenstrukturen nur schwach erkennbar.
Die Schanze wurde im Zusammenhang mit einer archäologischen Grabung näher untersucht; siehe dazu Kapitel 6 (Fehmbach).

3.2.6. Grabenanomalie Typ E: Deutlich erkennbare negative Anomalie

Beuren (Nr. 1)

Boden: Braunerde, z. T. pseudovergleyt, aus Lösslehm und Deckenschotter.
 Erhaltung: Verebnet.
 Bemerkung: Die Pfosten des Torbaus, welche bei einer Grabung identifiziert werden konnten, bilden sich sehr gut als positive Anomalien ab.
 Der Graben war nach dem Grabungsbefund mit einem wohl ortsfremden, auffällig gelben Lehmmaterial verfüllt (AMBS [2011]).

3.2.7. Grabenanomalie Typ F: Schwach erkennbare negative Anomalie

Loipfing (Nr. 19)

Boden: Braunerde und Parabraunerde aus Fließerden und Altmoränenmaterial.
 Erhaltung: Nahezu verebnet.
 Bemerkung: Bebauungsstrukturen kaum erkennbar.

Plattling-Pankofen (Nr. 26)

Boden: Parabraunerde über carbonatreichem Schotter.
 Erhaltung: Verebnet.
 Bemerkung: Bebauungs- und Grubenstrukturen schwach erkennbar.

3.2.8. Grabenanomalie Typ G: Keine Anomalie erkennbar

Laibstadt (Nr. 5)

Boden: Schwerer Lehm; Pseudogley und Braunerde-Pseudogley über Doggertonen.
 Erhaltung: Wall obertägig erhalten, Graben noch als Mulden erkennbar.
 Bemerkung: Auffällig ist die Diskrepanz zwischen dem Fehlen von Anomalien in den Bereichen von Wall und Graben, die sich magnetisch äußerst ruhig und ohne oberflächennahe Störungen (aufgrund kleiner Metallteilchen im Oberboden) darstellen, und den sich extrem gut abzeichnenden Bebauungsstrukturen. Anhand der Stärke der Anomalien bis mehrere 10 nT ist mit Sicherheit von Feuerwirkung auszugehen.
 Siehe auch Kapitel 7 / Laibstadt zur näheren Untersuchung der Anlage.

Aubing (Nr. 8)

Boden: Ackerpararendzina, Braunerde und Parabraunerde aus würmzeitlichem Schotter. Randstandort zum Moos, jüngste Grundwasserabsenkung.
 Erhaltung: Verebnet.
 Bemerkung: Es sind keinerlei Hinweise auf Graben, Wall und Bebauung zu erkennen.

Manching (Nr. 11)

Boden: Kalkgley aus Flussmergel über Schotter. Ursprünglich moorige Landschaft.
 Erhaltung: Verebnet.
 Bemerkung: Es sind keinerlei Hinweise auf Graben, Wall und Bebauung zu erkennen. – Der Bereich des unmittelbar westlich der Viereckschanze liegenden keltischen

Oppidums von Manching wurde mehrfach geophysikalisch untersucht und lieferte dabei auch kleinräumig sehr unterschiedlich aussagefähige Prospektionsergebnisse. Zu jüngsten Ergebnissen siehe WENDLING [2009].

Reithofen (Nr. 17)

Boden: Braunerden aus Lösslehm über Altmoräne. Sehr staunasser Boden.
 Erhaltung: Verebnet.
 Bemerkung: Sehr unsichere Hinweise auf Bebauung.

3.2.9. Grabenanomalie Typ H: Keine Aussage über Grabenanomalie möglich

Eybburg (Nr. 4):	keine genaue Einmessung der Prospektionsfläche vorhanden
Buchendorf (Nr. 9):	Graben wurde nicht prospektiert
Neufahrn (Nr. 10):	Graben wurde nicht prospektiert
Holzhausen (Nr. 13):	Graben wurde nicht prospektiert
Deisenhofen 3 (Nr. 14):	Graben wurde nicht prospektiert
Sondermoning (Nr. 21):	Graben wurde nicht prospektiert

3.2.10. Korrelation der Grabenanomalien mit Bodentypen

Deutlich erkennbare positive Anomalien im Graben (Typ A; eingeschränkt auch Typ B) sind messbar bei Böden, die überwiegend aus Parabraunerden, Braunerden, Pararendzina und sandigem Lehm gebildet werden. Nur einmal tritt schwerer toniger Lehm aus Tongesteinen auf, wobei hier die Trockenheit des Geländes hervorgehoben wird und zudem vermutlich die Einwirkung von Feuer vorliegt.

Beim Wechsel der Anomalietypen im Graben (Typen C und D) lassen sich zunächst Erosionsprozesse (Baisweil) oder lokal unterschiedliche Bearbeitungsweisen (Pfeffenhausen) vermuten. Bei diesen vier Anlagen findet man zweimal Braunerde / Parabraunerde aus Lösslehm und zweimal sandigen Lehm auf Kiesgrundlage.

Die Anlage vom Fehmbach wurde gezielt in dieser Hinsicht untersucht, siehe Kapitel 6.

Die Viereckschanze von Papferding ist schwierig einzuordnen, da sich die Grabenanomalien teilweise sehr schwach positiv, aber auch schwach negativ oder an manchen Stellen gar nicht abzeichnen. Auch diese Anlage wurde näher untersucht, siehe Kapitel 5.

Bei deutlich oder schwach negativen Anomalien (Typen E und F) handelt es sich um Braunerden, Parabraunerden oder Pseudogley-Braunerden über Fließerden, Löss oder Lösslehm, teilweise über Schotteruntergrund.

Gänzlich fehlende Anomalien (Typ G) finden sich bei schwerem tonigem Lehm, Pseudogley, Kalkgley bzw. einer lokal staunassen Braunerde als feuchtigkeitsgesättigten Böden, aber auch Ackerpararendzina aus Schotter tritt hier auf. Exemplarisch wurde hier die Anlage von Laibstadt, siehe Kapitel 7, näher untersucht.

Generell ist festzustellen, dass bei vollständig fehlenden Grabenanomalien mit drei von vier prospektierten Beispielen die wasserstauenden Böden dominieren. Nur die Viereckschanze von Aubing-Mooschwaige liegt auf Ackerpararendzina bzw. Braunerde über Schotteruntergrund, wo eigentlich ein guter Wasserabfluss aus den archäologisch relevanten oberen Bodenschichten gewährleistet sein sollte. Demgegenüber überwiegen bei den gut prospektierbaren Viereckschanzen die wasserdurchlässigen Böden wie Braunerden und Parabraunerden, Pararendzina und sandiger Lehm.

3.3. Magnetometrische Nachweisbarkeit der Innenbebauung von Viereckschanzen

3.3.1. Überblick: Korrelation der Nachweisbarkeit von Bebauung mit Nachweisbarkeit von Gräben, Bodentypen und Erhaltungszustand

In diesem Kapitel sollen die Prospektionsergebnisse auf die rein magnetometrische Erkennbarkeit von Bebauung hin untersucht werden, ohne auf Grabungs- und Luftbildbefunde oder einzelne Bauformen näher einzugehen.

Tabelle 3.1. zeigt den Zusammenhang zwischen der magnetometrischen Nachweisbarkeit der Bebauung, der Art der Grabenanomalie, dem Erhaltungszustand und Bodentyp. Für die archäologisch relevante Aufgliederung der Einzelbefunde siehe „Kapitel 4: Ergebnisse der Magnetometerprospektionen und archäologische Interpretation“ und dort insbesondere Tab. 4.2.

Nr.	Ort	Bebauung sichtbar	Graben- anomalie	Erhaltungs- zustand	Boden
1	Beuren	Ja	Negativ	Verebnet	Braunerde
2	Baisweil	Ja	Positiv	Verebnet	Sandiger Lehm
3	Weiltingen	Ja, Brand	Positiv	Fast verebnet	Toniger Lehm
4	Eybburg	Ja	?	Schwach	Toniger Lehm
5	Laibstadt	Ja, Brand	Nein	Wälle gut	Toniger Lehm
6	Hechendorf	Teilweise	Positiv	Verebnet	Parabraunerde
7	Egweil	Sehr gut	Positiv	Verebnet	Braunerde
8	Aubing	Nein	Nein	Verebnet	Pararendzina
9	Buchendorf	Schwach	?	Sehr gut	Braunerde
10	Neufahrn	Ja	?	Sehr gut	Sandiger Lehm
11	Manching	Nein	Nein	Verebnet	Kalkgley
12	Feldmoching	Ja	Positiv	Verebnet	Pararendzina
13	Holzhausen	Kaum	?	Wälle gut	Lehm
14	Deisenhofen 3	Ja	?	Sehr gut	Braunerde / Wald
15	Deisenhofen 1	Ja	Positiv	Gut	Braunerde
16	Teufstetten	Kaum	Schwach positiv	Verebnet	Pseudogley
17	Reithofen	Nein	Nein	Verebnet	Braunerde
18	Papferding	Kaum	Negativ	Fast verebnet	Braunerde
19	Loipfing	Kaum	Negativ	Fast verebnet	Braunerde
20	Maxing	Gut	Positiv	Verebnet	Braunerde
21	Sondermoning	Ja	?	Teilweise	Sandiger Lehm
22	Oberhaimbuch	Ja	Positiv	Verebnet	Sandiger Lehm
23	Pfeffenhausen	Ja	Wechselnd	Verebnet	Sandiger Lehm
24	Oberframmering	Sehr gut	Positiv	Verebnet	Pararendzina
25	Fehmbach	Schwach	Wechselnd	Verebnet	Sandiger Lehm
26	Plattling-Pankofen	Kaum	Negativ	Verebnet	Braunerde
27	Manndorf	Ja	Positiv	Verebnet	Parabraunerde

Tab. 3.1.: Magnetometrisch nachweisbare Bebauungen der untersuchten Viereckschanzen in Korrelation mit Erhaltungszustand und Bodentyp

3.3.2. Nachweisbarkeit von Bebauung und Gräben

Im Allgemeinen korreliert die Nachweisbarkeit der Bebauung mit derjenigen der Gräben. Allerdings treten auch Fälle auf, in denen bei gut nachweisbarem Graben kaum Bebauung zu erkennen ist (Beispiel Mandorf, siehe hierzu Punkt 3.3.5). Umgekehrt kann auch bei völligem Fehlen des Grabens im Magnetogramm die Bebauung gut erkennbar sein. Dies tritt bei den prospektierten Anlagen allerdings nur bei der Anlage von Laibstadt auf, bei der die Bebauung aufgrund von Brandereignissen vermutlich eine besonders hohe Anreicherung ferrimagnetischer Eisenoxide erfahren hat. Siehe hierzu auch Punkt 3.3.6. und Kapitel 7 / Laibstadt.

3.3.3. Nachweisbarkeit von Bebauung und Bodentypen

Tabelle 3.2. zeigt den Zusammenhang zwischen (bekannten) Bebauungsstrukturen und Bodentypen. Ist auch aus anderen Quellen nichts über die Bebauung bekannt, kann in der Tabelle keine Aussage darüber getroffen werden. Somit wird klar, dass die Baustrukturen vor allem auf sandigem Lehm überdurchschnittlich oft gut erhalten sind. Auch auf tonigem Lehm ist dies der Fall, wobei hier zwei der drei Anlagen Brandereignissen ausgesetzt waren. Bei Braunerde und mit wenigen Beispielen auch Parabraunerde und Pararendzina fallen die Ergebnisse etwa gleich häufig gut wie schlecht aus.

Boden	Nachweisbarkeit von Bebauungsstrukturen		
	Gut / Sehr gut	Mittel / schwach	Nein
Pararendzina	xx		x
Braunerde	xxxx	xxxx	x
Parabraunerde	x	x	
Pseudogley		x	
Sandiger Lehm	xxxxx	x	
Lehm		x	
Toniger Lehm	xxx		
Waldboden	x		
Kalkgley			x
<i>Tab. 3.2.: Zusammenhang zwischen Nachweisbarkeit der Bebauung und Bodentyp; jedes x steht für eine untersuchte Anlage.</i>			

3.3.4. Nachweisbarkeit von Bebauung und Erhaltungszustand

Ein Zusammenhang der magnetometrischen Nachweisbarkeit von Bebauungsstrukturen mit dem Erhaltungszustand insbesondere des Walles wäre denkbar, da hierbei der Oberboden des Innenraums in gewissem Maß vor Erosion und Abtragung geschützt ist. Aus Tabelle 3.1. lässt sich ein solcher Zusammenhang allerdings nicht nachweisen: Oft zeichnen sich die Baustrukturen bei völlig verebneten Anlagen im Magnetogramm gut bis sehr gut ab, während sie auch bei obertägig erhaltenen Anlagen manchmal kaum erkennbar sind, wie vor allem die Beispiele von Holzhausen und Buchendorf zeigen. Geochemische und bodenbildende Prozesse

spielen daher eine größere Rolle bei der geophysikalischen Nachweisbarkeit von Bebauung als der obertägige Erhaltungszustand der Anlagen.

Diese Aussage findet Ihre Grenzen bei der vollständigen Erosion der befundtragenden oberen Bodenschichten, wie im folgenden Punkt ausgeführt wird.

3.3.5. Erosion

Gerade auf den geophysikalisch gut prospektierbaren, weil zeitweise völlig bewuchsfreien landwirtschaftlich genutzten Flächen spielt Erosion der Bodendenkmäler eine wesentliche und problematische Rolle, wie GERSTNER [1996] anhand eindrucksvoller Luftbildbeispiele dokumentiert. Die Einebnung von Wällen und Gräben führt dazu, dass bei SCHWARZ [1959] noch als obertägig dargestellte Viereckschanzen heute schon als verebnet angesehen werden müssen. In der vorliegenden Arbeit trifft dies vor allem auf die Anlagen von Teufstetten (Anhang 3, Nr. 16), Papferding (Nr. 18) und Maxing (Nr. 20) zu.

Aber auch bereits verebnete Schanzen sind der weiteren Zerstörung ausgesetzt. LEOPOLD [2003] nennt in seiner Zusammenstellung von Werten prähistorischer Bodenerosion zwischen $20\text{m}^3/\text{ha/a}$ bis über $100\text{m}^3/\text{ha/a}$, was Abtragungen von bis zu 1 cm pro Jahr entspricht. VÖLKEL ET AL. [2002] berechnen am Beispiel der Viereckschanze von Poign bei Regensburg Erosionsraten nach unterschiedlichen Methoden: Die Massenbilanzierung von kolluvialen Depositionen am Hangfuß liefert $20,4\text{ t/ha/a}$, die Betrachtung der Mächtigkeit des Abtrags über gekappte Bodenhorizonte erbringt Werte von $13,3\text{ t/ha/a}$. Aus der von ihnen favorisierten Methode, dem Vergleich des rezenten Oberflächenverlaufs mit der unter dem Wall fossilisierten ehemaligen Erosionsoberkante, errechnet sich eine Erosionsrate von $24,5\text{ t/ha/a}$.

Magnetometrisch lassen sich in der vorliegenden Arbeit vor allem auf den fruchtbaren und daher intensiv bewirtschafteten Lössböden des niederbayerischen Gäubodens und Tertiärhügellandes anhand der hier aufgeführten, gut zeichnenden Viereckschanzenbefunde klar die einzelnen Stufen der Erosion nachvollziehen. Die typischen Merkmale hierfür sind in Magnetogrammen von Anlagen anderer Landstriche ebenfalls zu erkennen.

Als Beispiele für erosionsbedingte Phänomene in verschiedenen Ausprägungen seien hier genannt:

Hechendorf und Manndorf: Vermutlich tiefere Strukturen (Schächte) sind gut im Magnetogramm abgebildet, Gebäudespuren allerdings nicht oder nur sehr schwach. Daher wird eine Erosion der oberen gebäudetragenden Bodenschichten vermutet. Bei Oberhaimbuch sind Gräben und Baustrukturen im südlichen Bereich sehr gut zu erkennen, im Norden jedoch deutlich schwächer, was als hangbedingte Erosionserscheinung interpretiert wird und wie eine „Vorstufe“ zu Manndorf erscheint. Auch beim nordöstlichen Teil des Magnetogramms von Oberframming ist dieser Effekt zu beobachten.

3.3.6. Brandsituationen

Brandereignisse der hölzernen Bebauung lassen sich anhand der verstärkten magnetischen Anomalien nachweisen. In Brandhorizonten kann sich neben Hämatit aus den Ausgangs-oxiden Goethit, Siderit oder Lepidokrokit auch der stark ferrimagnetische Maghemit bilden (LE BORGNE [1955]; LE BORGNE [1960]; FAßBINDER [1994]). Die dabei hervorgerufenen Anomalien übersteigen die bei Gräben und Pfostenbauten üblichen 5-10 nT um ein Vielfaches.

MÜLLER [2008] wies mit Hilfe eines Fluxgate-Gradiometers der Firma Geoscan in der Kleinen Viereckschanze von Sallach, Lkr. Straubing-Bogen, den Abbrand der Innenbebauung nach. Bei einer anschließend durchgeführten Grabung an einem der betroffenen Bauten konnte sie in Zusammenarbeit mit HOFFMANN ET AL. [2006] (siehe auch HOFFMANN [2007]) die verstärkte Magnetisierung auf reduzierend verziegelten Lehm zurückführen. Die Gebäude in der unmittelbar benachbarten Großen Viereckschanze waren von dem Brandereignis offensichtlich nicht betroffen, sie weisen wesentlich schwächere und undeutlichere Anomalien auf.

In der vorliegenden Arbeit können Brandereignisse in zwei Fällen nachgewiesen werden, und zwar bei den Anlagen von Weiltingen (siehe Anhang 3, Nr. 3) und Laibstadt (Anhang 3, Nr. 5 sowie Kapitel 7). Die Anomalien weisen jeweils Intensitäten bis mehrere 10 Nanotesla auf. Ein Teil des Brandschutts scheint sich dabei jeweils am inneren Wallfuß gesammelt zu haben oder wurde eventuell auch dorthin verlagert. In Weiltingen treten verstärkte Anomalien innen entlang des nordwestlichen Walls, in Laibstadt vor allem in der nördlichen Ecke auf.

Kapitel 4. Ergebnisse der Magnetometerprospektionen und archäologische Interpretation

Neben der methodischen geophysikalischen Interpretation der Prospektionen sollen diese auch aus archäologischer Sicht betrachtet werden. Für die noch nicht abschließend geklärte Frage nach der Zweckbestimmung der Viereckschanzen ist verlässliches Datenmaterial zur Form und vor allem zur Bebauungssituation innerhalb und außerhalb der Anlagen vonnöten. Dieses Datenmaterial stellt die vorliegende Arbeit, soweit es aus den Prospektionsmessungen des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Luftbilddauswertungen und Grabungen entnommen werden kann, hier zusammen. Der Vorteil gegenüber Grabungen liegt in der zerstörungsfreien und jederzeit reproduzierbaren Vorgehensweise.

4.1. Größen und Eckwinkel der Viereckschanzen

Tabelle 4.1. zeigt eine Zusammenstellung der Seitenlängen, Innenraumflächen und Eckwinkel der prospektierten Viereckschanzen. Die zugrunde liegenden Prospektionsergebnisse bzw. Pläne finden sich im Katalogteil im Anhang dieser Arbeit.

Als Seitenlängen angegeben sind jeweils die äußeren Begrenzungen der Gräben, da diese Größen aus dem Magnetogramm, soweit dort sichtbar, am besten zu erkennen sind. Bei einzelnen Schanzen musste auf Grabungsergebnisse oder den Textteil des Kataloges der Bayerischen Viereckschanzen von SCHWARZ [2007] zurückgegriffen werden. Im letzteren Fall erfolgte die Berechnung der einzelnen Seitenlängen, indem dem Katalog die jeweilige Kronenlänge entnommen und zu dem Wert 17 Meter zugegeben wurde. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass die ursprüngliche Grabenbreite durchschnittlich fünf Meter und die Wallbreite etwa sieben Meter betragen haben dürfte (siehe WIELAND [1999], S. 42). Somit ergibt sich der Additionswert aus zwei Graben- sowie zwei halben Wallbreiten.

Alle Angaben zu Seitenlängen und Eckwinkeln beginnen jeweils an den nördlich bis nordöstlich ausgerichteten Seiten bzw. Ecken und setzen sich im Uhrzeigersinn gesehen fort.

Die Abschätzung des Innenraums erfolgte aus den äußeren Seitenlängen reduziert um 24 Meter (siehe oben) unter der Annahme einer angenäherten Rechteckform der Anlagen.

Nach SCHWARZ [1959] liegen 90% der obertägig erhaltenen Viereckschanzen in Bayern im Bereich von 3.000m^2 bis 15.000m^2 Innenraumfläche. Dies spiegelt sich auch bei den prospektierten Schanzen wider. Reithofen, Loipfing und Oberhaimbuch gehören hier zu den sehr kleinen Anlagen, während Beuren, Weiltingen, Neufahrn und auch Sondermoning sehr große einteilige Schanzen bilden.

Nr.	Ort	Quelle	Seitenlängen (Meter)				Innenraum	Eckwinkel			
1	Beuren	1, 5	182m	138m	182m	141m	18330m ²	88°	91°	87°	94°
2	Baisweil	1	-	-	-	107m		90°	-	-	91°
3	Weiltingen	1	131m	143m	133m	140m	12690m ²	96°	84°	95°	85°
4	Eybburg	3	Längen ca. 95-110 Meter				(7650m ²)	-	-	-	-
5	Laibstadt	3	115m	108m	114m	108m	7600m ²	89°	93°	88°	90°
6	Hechendorf	1	82m	100m	78m	71m	3440m ²	98°	79°	79°	104°
7	Egweil	1	113m	97m	120m	107m	7220m ²	94°	90°	94°	82°
8	Aubing	2	-	-	73m	-		-	94°	89°	-
9	Buchendorf	3	112m	113m	125m	112m	8360m ²	95°	94°	86°	85°
10	Neufahrn	3	121m	172m	113m	175m	13900m ²	87°	94°	87°	92°
11	Manching	2	80m	-	-	-		87°	92°	-	-
12	Feldmoching	1	69m	69m	65m	60m	1740m ²	92°	83°	88°	97°
13	Holzhausen	3	114m	109m	113m	104m	7380m ²	90°	88°	89°	93°
14	Deisenhofen 3	3, 4	124m	92m	99m	123m	7310m ²	66°	106°	89°	99°
15	Deisenhofen 1 ¹	3	135m	154m	133m	154m	14300m ²	90°	88°	92°	90°
16	Teufstetten	1	110m	105m	112m	109m	7220m ²	92°	89°	93°	86°
17	Reithofen	2	76m	74m	79m	71m	2600m ²	96°	83°	94°	87°
18	Papferding	1	95m	131m	103m	121m	7650m ²	89°	94°	81°	96°
19	Loipfing	1	77m	74m	79m	81m	2890m ²	91°	91°	94°	84°
20	Maxing	1	118m	120m	114m	119m	8790m ²	89°	90°	92°	89°
21	Sondermoning	3	Längen ca. 120-135 Meter				(12000m ²)	-	-	-	-
22	Oberhaimbuch	1	77m	78m	83m	74m	2910m ²	90°	87°	89°	94°
23	Pfeffenhausen	1	108m	124m	109m	120m	8280m ²	91°	90°	88°	91°
24	Oberframmering	1	90m	89m	89m	88m	4230m ²	93°	86°	94°	87°
25	Fehmbach	5; 1	109m	90m	109m	79m	5140m ²	90°	84°	96°	90°
26	Plattling-Pank.	5	103m	137m	107m	151m	9720m ²	85°	97°	91°	87°
27	Manndorf	1	113m	120m	114m	115m	8370m ²	87°	90°	89°	94°

¹ Nur Kernbereich der mehrteiligen Großschanze

Tab. 4.1.: Seitenlängen (äußere Grabenlängen), Innenraumflächen und Eckwinkel der untersuchten Viereckschanzen.

Datenquelle: 1) Magnetometerprospektion; 2) Luftbildbefund; 3) SCHWARZ [1959]; 4) Digitales Geländemodell, Datengrundlage: LVG; 5) Grabungsergebnis, siehe jeweils Literaturangabe bei den Einzelprospektionen in Anhang 3.

4.2. Bebauungssituation der Viereckschanzen

Tabelle 4.2 bietet einen Überblick über festgestellte mögliche oder gesicherte Gebäude oder Gruben im Innen- sowie Außenbereich der Viereckschanzen. In den Magnetogrammen finden sich dabei die typischen Häusergrundrisse wieder, die SCHAICH [2002] auf der Grundlage moderner Grabungen der Fa. ArcTron zusammenstellt.

Torgebäude sind als Innenbebauung erfasst. Bei Gruben kann es sich um Grubenhäuser ebenso handeln wie um etwaige Brunnen oder sonstige Schächte.

Bei fehlenden Angaben in einzelnen Feldern kann magnetometrisch keine Bebauung nachgewiesen werden, sie ist aber dennoch nicht auszuschließen.

Nr.	Ort	Quelle	Innenraum		Außenbereich	
			Gebäude, Pfosten, Pfosten- reihen	Gruben, Gruben- häuser, Schächte	Gebäude, Pfosten, Pfosten- reihen	Gruben, Gruben- häuser, Schächte
1	Beuren	1	Ja	Ja	Möglich	Ja
2	Baisweil	1	Ja	Ja	Möglich	Ja
3	Weiltingen	1	Ja	Ja	Möglich	Ja
4	Eybburg	1	Möglich	Ja		Ja
5	Laibstadt	1	Ja	Ja	Möglich	
6	Hechendorf	1, 2	Möglich	Ja		Ja
7	Egweil	1	Ja	Ja	Ja	Ja
8	Aubing	1, 2				
9	Buchendorf	1	Ja	Ja		
10	Neufahrn	1	Ja	Ja		
11	Manching	1, 2				
12	Feldmoching	1, 2	Ja	Ja	Möglich	Ja
13	Holzhausen	1, 3	Ja	Ja	Ja	
14	Deisenhofen 3	1	Ja	Möglich		
15	Deisenhofen 1	1	Ja	Ja		
16	Teufstetten	1	Möglich			
17	Reithofen	1, 2	Möglich	Ja		Ja
18	Papferding	1	Ja	Ja	Möglich	Ja
19	Loipfing	1	Möglich	Ja	Möglich	Ja
20	Maxing	1	Ja	Ja		Ja
21	Sondermoning	1	Ja	Ja		
22	Oberhaimbuch	1	Ja	Ja	Ja	Ja
23	Pfeffenhausen	1	Ja	Möglich		
24	Oberframmering	1	Ja	Ja	Ja	Ja
25	Fehmbach	1, 3	Ja	Ja	Ja	Ja
26	Plattling-Pankofen	1, 3	Ja	Ja		Ja
27	Manndorf	1, 2	Möglich	Ja		Ja

*Tab. 4.2.: Bebauungssituation der untersuchten Viereckschanzen.
Datenquelle: 1) Magnetometerprospektion; 2) Luftbildbefund; 3) Grabungsergebnis, siehe jeweils Literaturangabe bei den Einzelprospektionen im Katalogteil / Anhang.*

4.3. Einzelbetrachtungen

Anhand der Magnetometerprospektionen konnten folgende Einzelbefunde aus den Viereckschanzen erkannt werden:

- „Hauptgebäude“
- Mehrphasige Gebäude
- weitere Pfostenbauten und Pfostenreihen
- Grubenhäuser, Gruben und Schächte
- Torgebäude
- Wasserzu- oder Abläufe zum / vom Graben

Anhand der Interpretationspläne jeder Anlage in Anhang 3 können die jeweils festgestellten Befundtypen nachvollzogen werden.

Kapitel 5. Gelände- und Labormessungen – Papferding

5.1. Lage und Geschichte der Viereckschanze

5.1.1. Lage, Geologie und Boden

Die Viereckschanze von Papferding liegt etwa 35 Kilometer nordöstlich von München im Landkreis Erding, Gemeinde Bockhorn (siehe auch Anhang 3, Nr. 18). Zusammen mit den ebenfalls magnetometrisch untersuchten Anlagen von Teufstetten (Anhang 3, Nr. 16) und Reithofen (Anhang 3, Nr. 17) sowie mehreren weiteren, verebneten wie auch obertägig erhaltenen Schanzen ist sie Teil der sogenannten „Erdinger Gruppe“ (IRLINGER [1996b]). Die Anlage liegt auf einem schwach ausgeprägten, nach Süden und Westen hin abfallenden Geländesporn (siehe Abb. 5.1.). Die Entwässerung des ehemaligen Schanzengrabens erfolgt in den dort verlaufenden Kinzlbach; ein direkter Wasserzulauf ist nicht erkennbar.

Über dem Kiesuntergrund der hier vorliegenden risseiszeitlichen Endmoränenlandschaft konnte sich während der Würmeiszeit eine mehrere Meter mächtige Lössüberdeckung ansammeln, aus welcher sich später Braunerden und Pseudogleye herausbildeten. Der Boden neigt deutlich zur Staunässe, weshalb die Erfordernisse der landwirtschaftlichen Nutzung Drainagemaßnahmen erforderlich machten (siehe Kapitel 5.3.).



Abb. 5.1.:
Viereckschanze Papferding, digitale
Ortskarte.
Quelle: BayernViewer / Bayerische
Vermessungsverwaltung 2009.



Abb. 5.2.:
Viereckschanze Papferding, BLfD Luftbild
Nr. 7736_029_173_36 vom 25.03.1979,
Fotograf: O. Braasch.
Blickrichtung von Süden.

5.1.2. Historische Entwicklung

Mit der Auswertung von Lesefunden sowie von verfügbaren historischen Quellen zur zeitlichen Entwicklung der Viereckschanze und ihrer Besiedlungsgeschichte beschäftigt sich vor allem KRAUSE [2008]. Demnach lässt sich eine Besiedlung bereits im Endneolithikum und zur Bronzezeit nachweisen. Zahlreiche Lesefunde datieren aber auch in die jüngere Latènezeit und fallen damit zeitlich in die Nutzungsperiode der Viereckschanze. Die Verbreitung der spätkeltischen Fundstücke umfasst dabei das Gebiet der Schanze selbst sowie eine Fläche bis knapp 100 Meter in östlicher sowie etwa 150 Meter in südöstlicher Richtung, was Hinweise auf eine mögliche zeitgleiche Außensiedlung gibt. – Eine landwirtschaftliche Nachnutzung des Areals in späterer, vermutlich mittelalterlicher, Zeit ist durch die im Luftbild deutlich erkennbaren Wölbackerstrukturen belegt, die im Innenraum der keltischen Anlage parallel zu deren Nord- und Südwall verlaufen, außerhalb der Schanze jedoch teilweise von dieser bevorzugten Richtung abweichen (siehe Abb. 5.2.). Zur Zeit der Uraufnahme im Jahr 1814 war das Areal dann vollständig bewaldet, wurde aber später streifenweise wieder in Ackerland umgewandelt; dieser Prozess war vermutlich bis Anfang des 20. Jahrhunderts abgeschlossen.

Bei SCHWARZ [1959] ist die Schanze als obertägig eingetragen, wobei die Höhendifferenzen zwischen Wall und Graben schon zum Zeitpunkt dieser Kartierung nur mehr etwa einen Meter betragen. Im Zuge der Flurbereinigung Anfang der 1980er Jahre wurde das Gelände verschleift und insbesondere die Grabenreste verfüllt, weshalb die Schanze seither bis auf schwach wahrnehmbare Geländestufen im südlichen Wall-Graben-Übergang als verebnet gelten muss.

5.2. Magnetometerprospektion

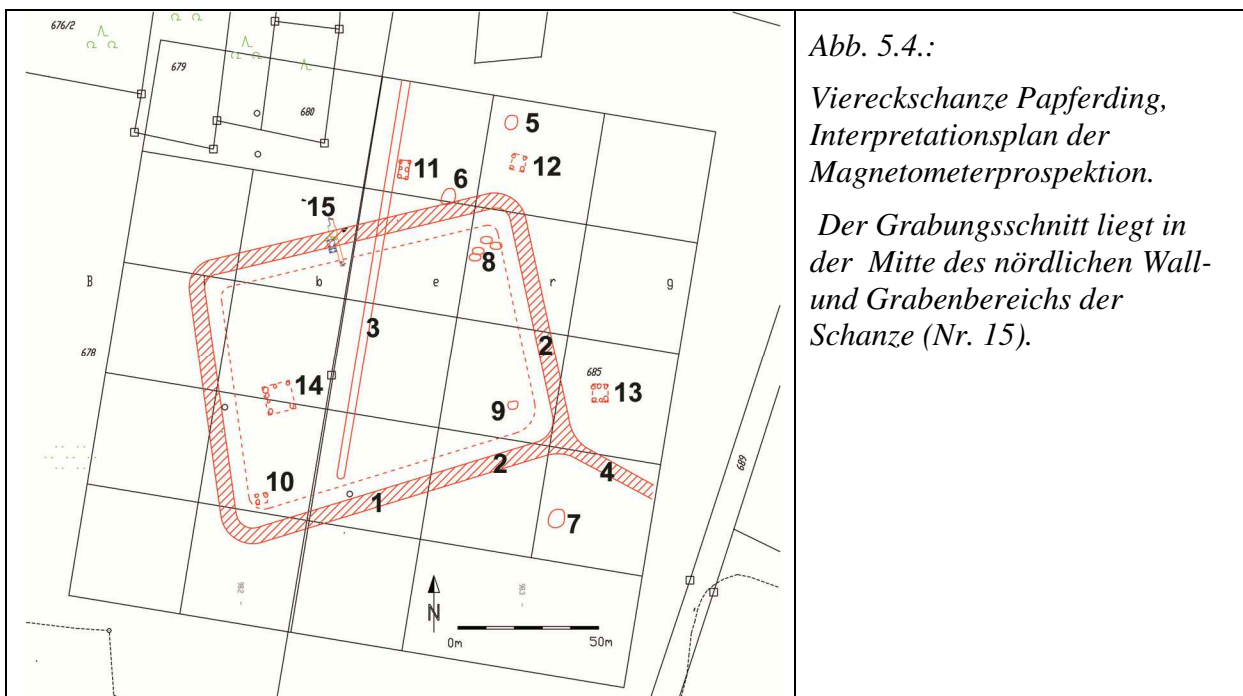
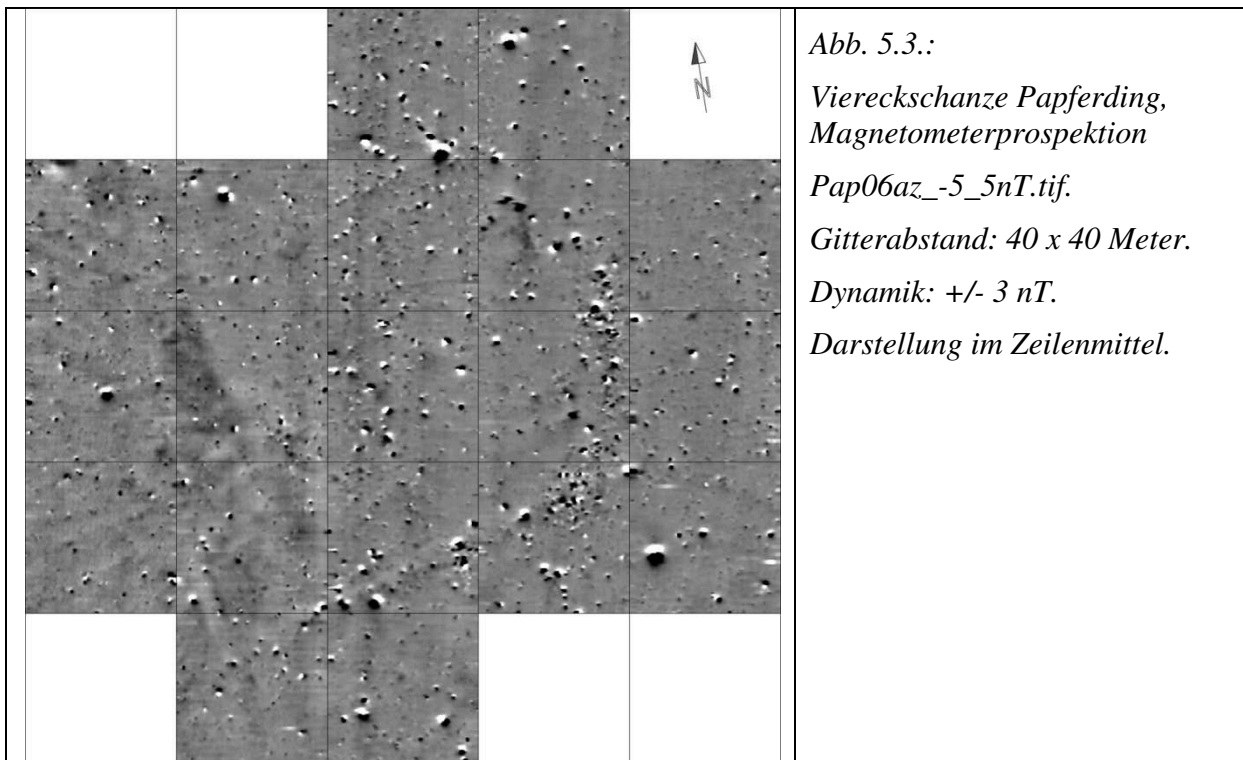
Die Viereckschanze wurde im Mai 2006 mit dem Cäsiummagnetometer Scintrex Smartmag SM4G-Special prospektiert (BERGHAUSEN & KRAUSE [2007a]). Die Abbildungen 5.3. und 5.4. zeigen das Magnetogramm sowie den daraus und aus dem Luftbildbefund resultierenden Interpretationsplan.

Generell ist das Magnetogramm durch extrem schwache magnetische Anomalien charakterisiert. Vor allem der Grabenverlauf (Abb. 5.4, 1) ist allein anhand des Magnetogramms kaum zu bestimmen. Entlang des südlichen bis etwa zur Mitte des westlichen Grabens lässt sich eine schwach negative Anomalie erkennen, während westlich der Nordecke eher eine positive Anomalie zu erahnen ist.

Manche Anomalien sind als rezent zu deuten: So ist der Bereich um die östliche Ecke herum geprägt von einer Anhäufung kleinteiliger Störungen (Abb. 5.4., 2), welche klar auf die Verfüllung dieses Grabenteils mit ortsfremden Material, möglicherweise Bauschutt, während der Flurbereinigung zurückgeführt werden können. Eine lang gestreckte Anomalie (Abb. 5.4., 3) deckt sich mit dem Verlauf einer früheren Feldgrenze; ein ehemals als Weg genutzter Feldrain zweigt in südöstlicher Richtung vom Graben ab (Abb. 5.4., 4).

Doch auch archäologische Spuren sind im Magnetogramm erkennbar. Die stärksten Einzelanomalien (Abb. 5.4., 5-7) werden vermutlich durch Schmiedeöfen hervorgerufen, während die etwas weniger starken Anomalien (Abb. 5.4., 8-9) Feuerstellen darstellen können. Des Weiteren finden sich schwache Spuren, welche Pfostenstellungen von Gebäuden bezeichnen können, so im Innenraum der Schanze in der Südecke (Abb. 5.4., 10) sowie im Außenbereich unmittelbar vor dem östlichen und nördlichen Grabenbereich (Abb. 5.4., 11-13). Die größte Pfostenstruktur (Abb. 5.4., 14) kann als das Hauptgebäude der Anlage interpretiert werden. Dieses und auch die Anhäufung von Lesefunden östlich und südöstlich

der Anlage legt die Annahme eines Tordurchlasses auf der Ostseite nahe, wenngleich dieser weder im Gelände noch im Luftbild erkennbar ist.



5.3. Grabung

5.3.1. Überblick

Um die Ergebnisse der Magnetometerprospektion und insbesondere die extrem schwach ausgeprägte magnetische Anomalie im Graben besser deuten zu können, wurde im Oktober und November 2007 ein etwa 1,2 Meter breiter, 17 Meter langer und bis zu 1,7 Meter tiefer Grabungsschnitt durch den Bereich des ehemaligen nördlichen Walls und Grabens der Viereckschanze angelegt. Die genaue Lage dieses Schnittes ist in Abb. 5.4. als Nummer 15 gekennzeichnet. Die Grabung erfolgte in Zusammenarbeit mit H. Krause und dem Grabungstechniker U. Händler (siehe auch PÉTRONILLE [2009]).

Der Schnitt verläuft längs annähernd in Nord-Süd-Richtung, wodurch sich zwei Grabungsprofile ergeben: Das östlich gelegene Profil 1 sowie das westliche Profil 2 (siehe Abb. 5.5.).



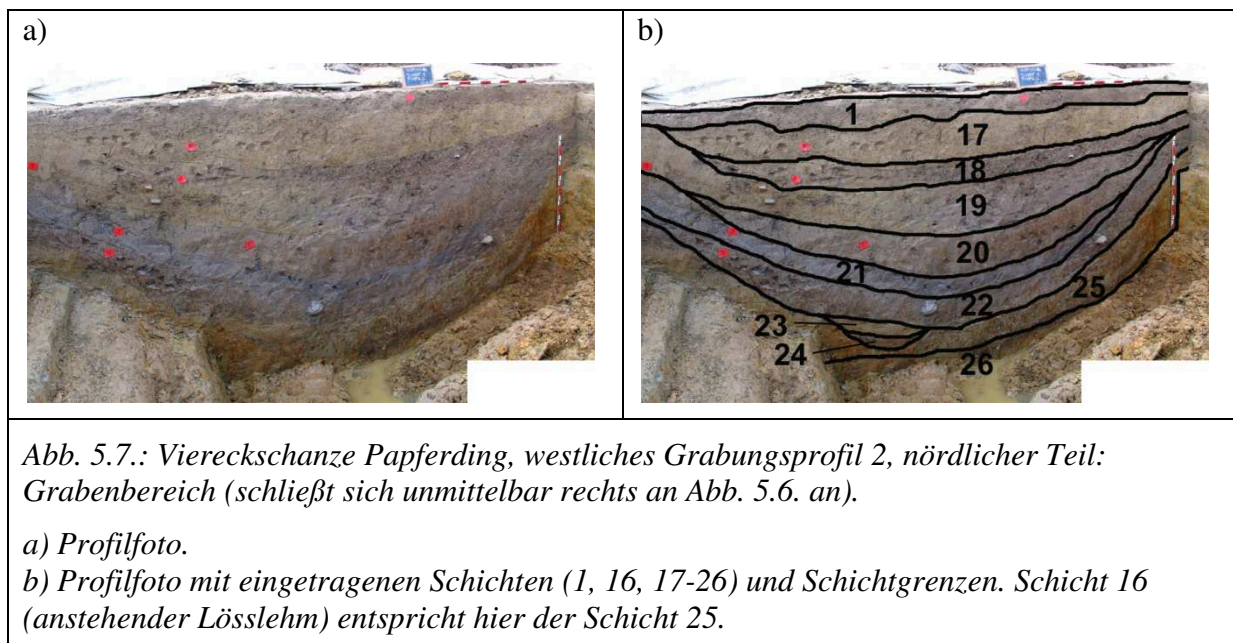
Abb. 5.5.: Viereckschanze Papferding, Anlage eines Grabungsschnittes durch Wall- und Grabenbereich.

- a) Überblick über den Grabungsschnitt mit dem östlichen Profil 1 (rechts im Bild) und dem westlichen Profil 2 (links im Bild); Blick in Richtung Norden.
- b) Blick auf das östliche Profil 1. Der ehemalige Graben ist im oberen Bildteil durch den Verlauf der blaugrau reduzierten Bodenschichten gut zu erkennen.
- c) Einbruch des Grabenprofils 1 durch aufgestautes Regen- bzw. Grundwasser.

Die beiden Profile enthalten in groben Zügen die gleichen Schichtfolgen, wobei sich in Profil 2 ein größerer Detailreichtum zeigte: So sind nur in diesem westlichen Profil Reste der ehemaligen Wallschüttung erkennbar, zudem traten hier unter dem keltischen Wall noch ältere, bronzezeitliche Grubenverfüllungen auf (siehe Kapitel 5.3.2.). Daher beziehen sich die folgenden Auswertungen und Probenuntersuchungen auf das Profil 2.

5.3.2. Schichtfolgen in Profil 2

Abbildung 5.6. zeigt den verebneten Wallbereich, Abbildung 5.7. den unmittelbar rechts (nördlich) davon sich anschließenden Grabenbereich der ehemaligen keltischen Viereckschanze.



Die Schichten 1 bis 16 liegen unter dem ehemaligen Wall. Im Graben finden sich davon die oberste Schicht 1 sowie die Schicht 25 (=16) des anstehenden Lösslehms wieder, daneben die nur im Graben vorkommenden Verfüllungsschichten 17 mit 24 sowie Schicht 26; siehe auch Tabellen 5.1. und 5.2. Die Abbildung 5.8. zeigt weitere charakteristische Bilder des Profils.

Nr.	Farbe	Textur	Beschreibung	Bezeichnung
1	dunkelbraun-grau	humos	vereinzelt Quarzkiesel; Wurzeln; im Grabenbereich ca. 20-30 cm tiefgründiger	Rezenter Pflughorizont / Oberbodenhorizont (Ah)
2	grau-gelb-braun	heterogen	Drainagegraben mit auf der Sohle liegendem Drainagerohr; Verfüllung aus Oberboden und Lösslehm	Rezente Drainageschicht / moderne Störung
3	Grau-gelb, dunkelgrau gefleckt	Krümelfüge, leicht subpolyedrig bis schluffig	Holzkohle-Flitter; massive Ausfällung von schwarzen Mangan-Konkretionen bes. an der Unterseite; vereinzelte Quarzkiesel	Restwellschüttung, keltisch
4	hellgrau-weißlich gefleckt; rostbraune Anteile	Subpolyedergefüge, tonig-lehmig	pseudovergleyte Braunerde; Bereiche mit Bleichungszonen sowie rostbrauner Eisenoxid-Ausfällungen; Spuren von Wurzelgängen ausgewachsener Bäume; schwarze Mangan-Konkretionen	Stark gefleckter Staunässe-Horizont
5	grau-schwarz-braun	Subpolyedergefüge, lehmig, teils krümelig	stark holzkohlehaltige Brandschicht, mit orange verziegeltem Lehm und Gefäßkeramik durchsetzt	Bronzezeitliche Verfüllung / Brandschicht
6	dunkelbraun-grau	Subpolyedergefüge	enthält Holzkohlepartikel	Bronzezeitliche Verfüllung / Brandschicht
7	gelb-braun	Polyedergefüge, tonig	aus Lösslehm bestehende Verfüllung	Bronzezeitliche Verfüllung
8	dunkelbraun-grau	Subpolyedergefüge, tonig	am nördlichen Ende vom Graben gekappt	Bronzezeitliche Verfüllung
9	grau bis gelb	Polyedergefüge, lehmig	teils dunkelbraune Einschlüsse	Bronzezeitliche Verfüllung
10	gelb-braun	Polyedergefüge, lehmig	leicht heterogene Zusammensetzung	Bronzezeitliche Verfüllung
11	gelb-braun	Polyedergefüge, lehmig	sehr homogen	Bronzezeitliche Verfüllung
12	grau-braun	Subpolyedergefüge bis Krümelfüge	Enthält Spuren von Holzkohle	Bronzezeitliche Verfüllung
13	hellgrau-weiß	Subpolyedergefüge	hellgrau-weiß reduziert; randlich orange-rote Eisen-Ausfällungen	Wurzelgang
14	Hellgrau-gelb; oberer Bereich verbraunt	Polyedergefüge, mit Tiefe zunehmend tonig-schluffig	starke Eisen- und Manganfleckung weist auf staunasse Bedingungen hin; Spuren von Wurzelgängen und Haarrissen. Im oberen Bereich Verbraunung durch Bodenbildung.	Anstehender Lösslehm
15	hellgrau bis blau-grau reduziert	Polyedergefüge, sehr tonreich	große Fleckungen mit orange-rot oxidiertem Eisen; Mangankonkretionen; im Grabenbereich wurde diese Schicht durchbrochen → Absenkung des Wasserspiegels	Stauwasser führende Schicht
16 (25)	hellgelb-braun	Polyedergefüge, tonhaltig		Anstehender Lösslehm. Entspricht Schicht 25 im Grabenbereich.

Tab. 5.1.: Viereckschanze Papferding, Profilbeschreibung des westlichen Grabungsprofils 2, südlicher Teil: Bereich unter dem ehemaligen Wall.

1	dunkelbraun-grau	humos	vereinzelt Quarzkiesel; Wurzeln; im Grabenbereich ca. 20-30 cm tiefgründiger	Rezenter Pflughorizont / Oberbodenhorizont (Ah)
17	hellgelb-braun; leicht fleckig	Polyeder- bis Subpolyedergefüge	Reste der im Zuge der Flurbereinigung einplanierten Wallschüttung; Lösslehm, heterogen vermengt, lockere Lagerung	Jüngste Grabenverfüllung (nach Flurbereinigung)
18	bräunlich	humos, lockerkrümelig; tonreich	Deckt die darunter liegenden Verfüllschichten ab	Ehemaliger Oberbodenhorizont (vor Flurbereinigung)
19	hellgelb-braun	Polyedergefüge, lehmig	Teils blaustichig durch Reduktion im Stauwasserbereich	Grabenverfüllung
20	Hellgrau; rostbraun gefleckt	Polyedergefüge, lehmig bis tonig	kompakt	Grabenverfüllung
21	grau-blau	Polyedergefüge, lehmig bis tonig	sehr verdichtet	Grabenverfüllung. Reduktionshorizont Gr
22	grau-blau, orangerot gefleckt	Polyedergefüge, lehmig	Sehr verdichtet und kompakt. Einschlüsse von Quarzkieseln (Ø ca. 10 cm); Mangankonkretionen	Grabenverfüllung
23	hellgelb	Polyedergefüge, lehmig	Mehrphasigkeit des Grabens? Schicht enthält Mangankonkretionen	Reste einer weiteren Grabenspitze?
24	dunkelbraun bis gelb	Subpolyedergefüge, lehmig bis humos	enthält Mangankonkretionen	Reste einer weiteren Grabenspitze?
25 (16)	hellgelb-braun	Polyedergefüge, tonhaltig		Anstehender Lösslehm. Entspricht Schicht 16 unter dem Wallbereich.
26	graubraun bis gelb	Polyedergefüge, tonreich	massive Mangan-Ausfällungen, Beimischung von Quarzkiesen; horizontale Schichtung, Grenzen teils unklar	Schichtgrenze vom Lösslehm zur Grundmoräne

Tab. 5.2.: Viereckschanze Papferding, Profilbeschreibung des westlichen Grabungsprofils 2, nördlicher Teil: Bereich des ehemaligen Grabens.

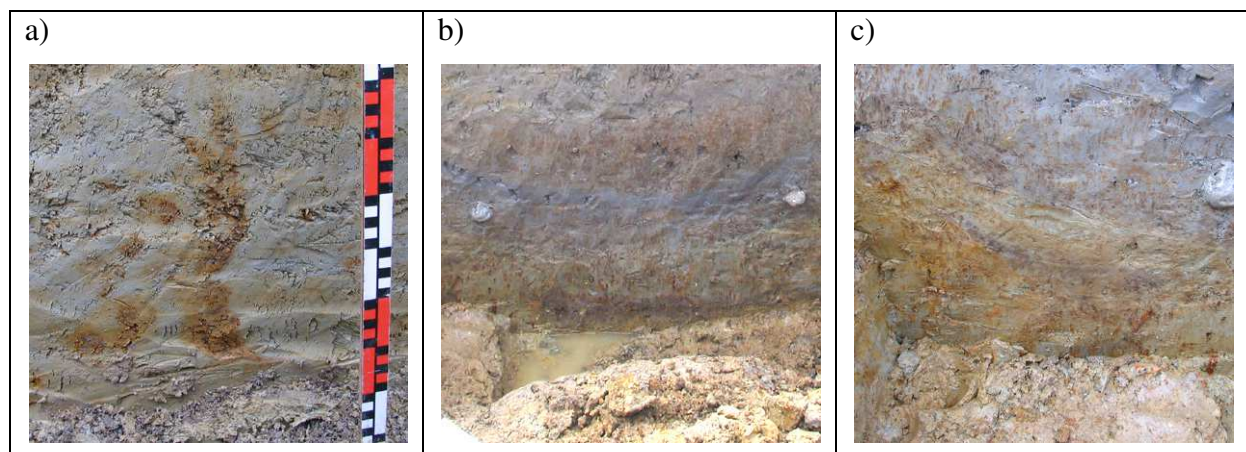


Abb. 5.8.: Viereckschanze Papferding, Detailfotos von Profil 2.

a) Wallbereich, Schicht 15/16: Starke Hinweise auf Reduktion sowie rostrote Fleckung.

b) Grabensohle Profil 2, mit grau reduzierter Schicht und Rostfleckung.

c) Graben Profil 2, Schichten 21 bis 26 mit möglichen weiteren Grabenspitzen (Schichten 23 und 24).

Die Erläuterungen der magnetometrischen Messungen werden im Folgenden jeweils getrennt in den „Bereich unter dem ehemaligen Wall“ sowie den „Grabenbereich“. Hierdurch können die Eigenschaften dieser beiden Bodenkomplexe bzw. ihre Unterschiede und Übereinstimmungen am besten herausgestellt werden. Festgehalten sei zunächst:

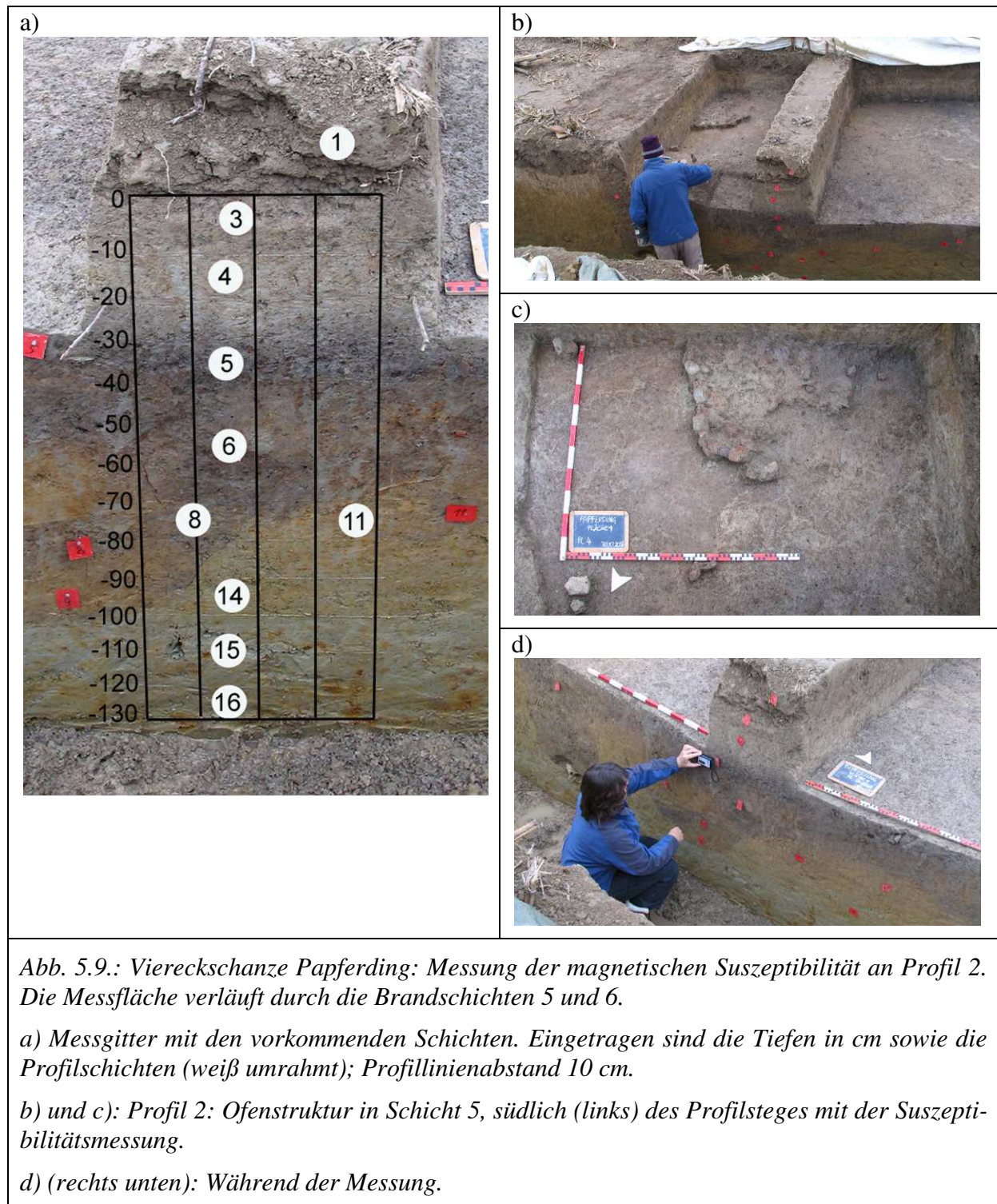
- Der Bereich unter dem Wall umfasst Bodenschichten, deren Lössschichten sich während der Würmeiszeit ansammelten und die sich postglazial zu Braunerden und Pseudogleyen umbildeten, sowie bronzzeitliche Verfüllungsschichten.
- Der Grabenbereich dagegen wurde erst im Spätlatène ausgehoben und ab diesem Zeitpunkt sukzessive bis in die 1980er Jahre hinein verfüllt, die hier gebildeten Bodenschichten sind also deutlich jünger.
- Durch die deutliche graublaue Färbung der unteren Grabenfüllung ist ein starker Stauwassereinfluss mit reduzierenden Bedingungen erkennbar. Die deutliche rostfarbene Fleckung lässt die Anwesenheit von Lepidokrokit vermuten. Diese Feuchtemerkmale sind im Wallbereich sehr viel weniger deutlich ausgeprägt (Abb. 5.6., 5.7., 5.8.).

5.4. Suszeptibilitätsmessungen am Grabungsprofil 2

Neben der archäologischen Arbeit an den Grabungsprofilen wurden am westlichen Profilschnitt flächenhafte Messungen der Suszeptibilität mit einem Kappameter SM-30 der Firma ZH Instruments (siehe Anhang 1) durchgeführt. Bei dem Bereich unter dem Wall handelt es sich um eine aus fünf senkrechten Profilen bestehende Messfläche der Abmessung 50x130cm. Im Grabenbereich wurde eine Fläche von 160 cm Breite und 150 cm Tiefe gemessen.

5.4.1. Suszeptibilitätsmessungen am Grabungsprofil 2 im Wallbereich

Der gemessene Bereich liegt in Abbildung 5.6.b im rechten Bilddrittel (Orientierung anhand der Schichtzuordnung); er beinhaltet die Brandschichten 5 und 6. Der Pflughorizont (Profil 1) wurde wegen seiner rauen Profilfläche ausgeklammert, weshalb die Suszeptibilitätsmessung die Schichten 3 mit 16 umfasste. Die gemessenen Punktabstände betrugen 10 cm (horizontal) bzw. 5 cm (vertikal).



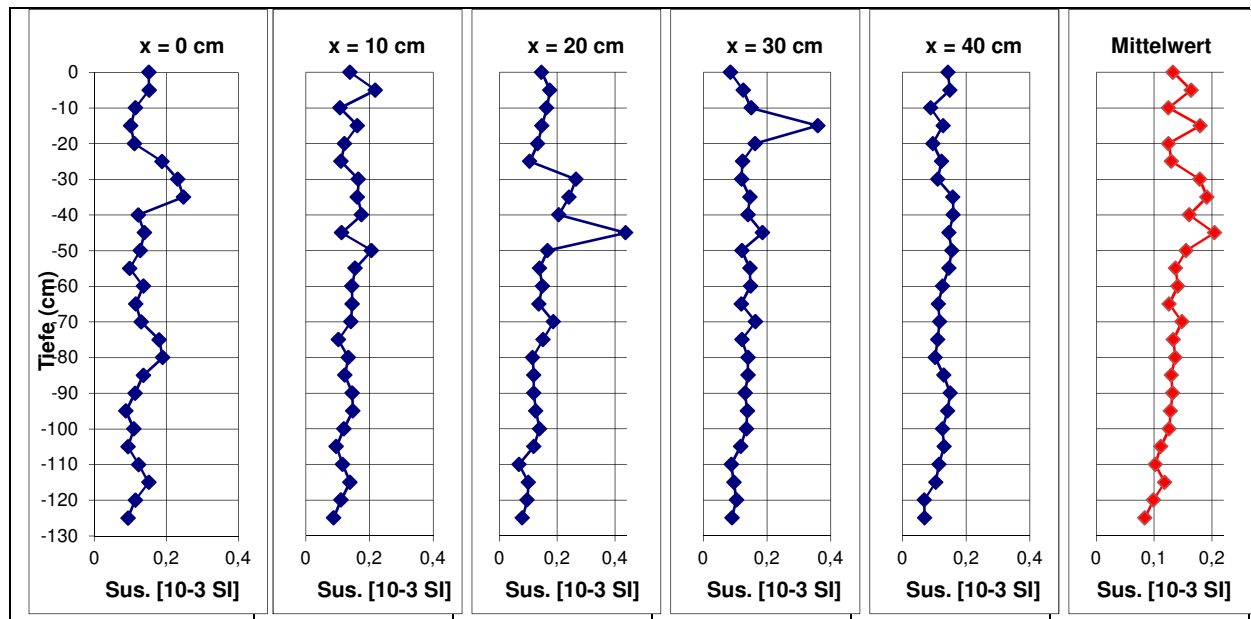


Abb. 5.10.: Viereckschanze Papferding, Messergebnisse der magnetischen Suszeptibilität an Profil 2.

Die Ergebnisse sind in Einzelprofilen von links nach rechts dargestellt. Die Kurve rechts zeigt das arithmetische Mittel über die Einzelkurven.

Ergebnisse:

- Die Oberbodenschicht 1 wurde hier nicht prospektiert. In der obersten Bodenschicht zeigen sich jedoch bei Suszeptibilitätsuntersuchungen an Bodenprofilen in der Regel die höchsten Messwerte. Da diese Schicht 1 (Pflughorizont) aufgrund seiner hohen Rauigkeit hier nicht vermessen wurde, fehlen die zu erwartenden hohen Messwerte. Vgl. hierzu auch Abschnitt 5.4.2.
- Extreme positive Messwerte treten vor allem zwischen 20 und 45 cm Tiefe auf. Diese bestätigen die Identifizierung der Schichten 5 und 6 als Brandschichten mit erhöhtem Gehalt an ferro(i)magnetischen Mineralen (siehe auch Kapitel 7 / Laibstadt).
- Ein deutlicher Abfall der Messwerte ab 105 cm Tiefe korreliert mit dem Beginn des Stauwasserbereichs und der deutlich graublau reduzierten Bodenschicht Nr. 15.

5.4.2. Suszeptibilitätsmessungen am Grabungsprofil 2 im Grabenbereich

Das westliche Profil 2 war am Ort des ehemaligen Grabens der Viereckschanze ebenso wie Profil 1 wegen des hohen Grundwasserstandes eingebrochen (siehe Abbildungen 5.5.c und 5.11.). Nach der Auskofferung des Profils unmittelbar vor der Messung der Suszeptibilität konnte wegen des schnell steigenden Wasserspiegels nach dem Abpumpen und der Instabilität des Profils nur die rechte Hälfte desselben vermessen werden; die rapide Verschlechterung der Wetterlage (Sturm und Schneeregen) ließ auch danach keine Ergänzung der Messung mehr zu. Senkrecht in der Profilmitte sowie in der linken Profilhälfte wurde bevorzugt die Beprobung vorgenommen.

In Abbildung 5.12. sowie Tabelle 5.3. sind die Ergebnisse der Suszeptibilitätsmessung dargestellt.

Abb. 5.11.: Viereckschanze Papferding, Profil 2, Grabenbereich. Situation unmittelbar vor der Messung der Suszeptibilität.

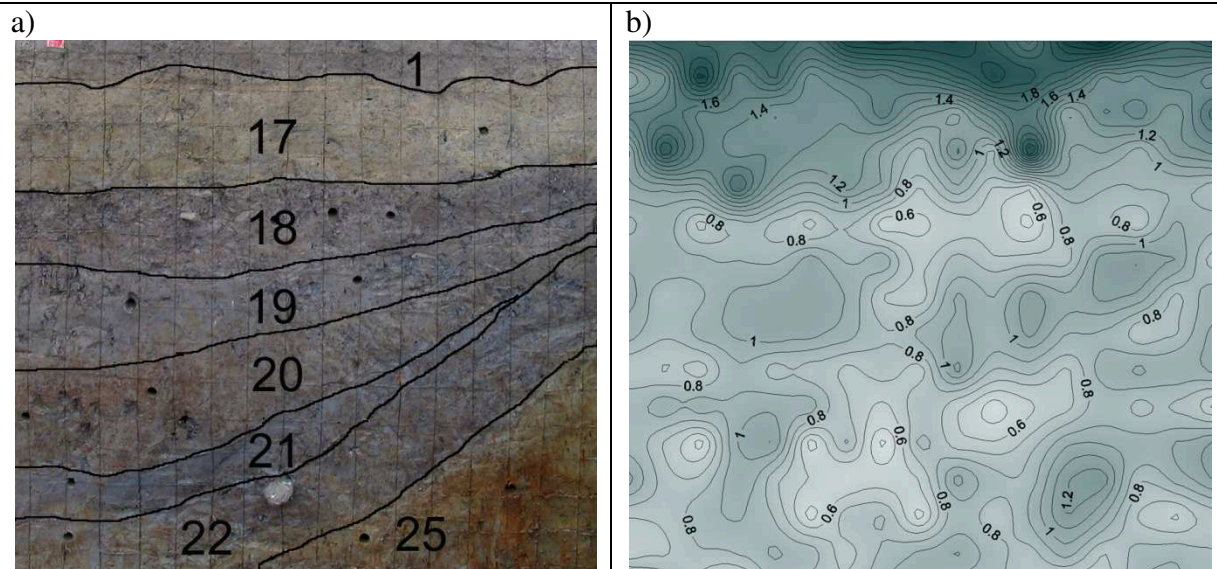


Abb. 5.12.: Viereckschanze Papferding, Profil 2, rechte Grabenhälfte.

Suszeptibilitätsmessungen, Messfläche 160 cm breit x 150 cm tief. Die Teilabbildungen a und b sind deckungsgleich.

a) Messfläche mit Schichtgrenzen.

b) Werte der Suszeptibilität in 10^{-4} SI-Einheiten. Messpunktabstand 10 x 10 cm.

Ergebnisse:

- Wie erwartet, treten in der Oberbodenschicht 1 die höchsten Werte der Suszeptibilität auf. Wie Tabelle 5.3.b zeigt, liegen die Durchschnittswerte in Schicht 1 mehr als doppelt so hoch wie in den Schichten 18-22. Die direkt unterhalb von Schicht 1 liegende Nr. 17 trägt mittlere Werte.
- In Schicht Nr. 18 (früherer Oberboden) treten niedrigere Werte auf als in der direkt darunter liegenden Schicht 19. Dies ist unerwartet, da im Oberboden die Werte im Normalfall höher liegen als in den darunter liegenden Bodenpartien. Offensichtlich hat die vor einigen Jahrzehnten während der Flurbereinigung durchgeführte Überdeckung von Schicht 18 in dieser bereits zu einer Veränderung bzw. Verlagerung der Eisenoxide geführt, einhergehend mit einer Abschwächung der Suszeptibilität.
- In Schicht 21, dem am stärksten reduzierten Horizont, treten die niedrigsten Suszeptibilitätswerte auf; dieses Ergebnis entspricht den Erwartungen.

a)

cm	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160
0	1,890	2,000	1,860	1,850	1,990	1,730	2,210	2,260	2,210	2,210	1,950	1,640	2,250	2,460	2,090	1,880	2,020
10	1,060	1,350	2,290	1,520	1,840	1,340	1,530	1,540	1,710	1,900	2,200	2,070	1,830	1,350	1,360	1,500	1,320
20	1,530	1,600	1,440	1,460	1,290	1,370	1,310	1,580	1,220	1,050	1,470	1,630	1,060	1,420	1,470	1,220	1,660
30	1,040	2,040	1,510	1,320	1,400	1,290	1,250	1,080	0,850	1,360	0,841	2,210	1,100	1,120	0,942	1,260	1,350
40	1,070	1,130	1,150	1,760	1,220	1,050	1,260	1,090	0,689	1,010	0,691	0,612	1,030	0,914	0,918	0,910	0,833
50	0,857	0,975	0,642	0,831	0,764	0,647	0,806	0,515	0,559	0,642	0,665	0,465	0,843	0,801	0,698	1,020	0,932
60	0,982	0,999	0,940	0,902	0,878	1,070	0,881	1,010	0,661	0,859	0,713	0,752	0,741	1,170	1,210	1,110	0,736
70	1,060	0,787	0,878	1,030	1,050	1,080	0,994	0,680	0,622	1,030	0,889	1,180	1,010	1,140	1,070	0,759	0,989
80	0,970	0,819	0,964	1,030	1,080	1,050	0,961	0,808	0,942	1,040	0,892	1,140	0,897	0,884	0,695	0,784	1,030
90	0,700	0,687	0,623	0,889	0,739	0,745	0,654	0,769	0,630	1,150	0,792	0,856	0,671	0,976	1,040	1,000	1,030
100	0,883	0,989	0,983	0,924	0,980	0,971	0,710	0,572	0,791	0,615	0,423	0,576	0,655	0,853	0,743	0,778	0,572
110	0,851	0,687	0,433	1,010	1,110	0,429	0,830	0,352	0,848	0,630	0,611	0,749	0,982	0,991	0,949	1,010	1,120
120	1,060	0,757	0,724	1,000	0,722	0,601	0,496	0,558	0,599	1,060	0,848	0,824	1,190	1,270	0,800	0,943	1,110
130	0,705	0,730	0,876	0,909	0,796	0,442	0,774	0,820	0,440	0,865	0,695	0,913	1,210	1,010	0,674	0,568	0,733
140	0,616	0,677	0,792	0,814	0,927	0,873	0,645	0,818	0,926	1,020	0,862	0,748	0,965	0,692	0,853	0,890	
150	1,110	0,949	0,629	0,420	0,834	0,732	0,691	0,928	0,967	0,789	0,824	0,689	0,613	0,584	0,925		

Tab. 5.3.: Viereckschanze Papferding, Profil 2, rechte Grabenhälfte: Ergebniswerte der Suszeptibilitätsmessungen in 10^{-4} SI-Einheiten.

a) Einzelwerte

b) Anzahl der Messwerte pro Schicht, Minimal- und Maximalwert, arithmetischer Mittelwert.

b)

Schicht	Anzahl	Min	Max	Ø
Schicht 1	30	1,06	2,46	1,87
Schicht 17	48	0,69	2,04	1,32
Schicht 18	19	0,47	1,03	0,75
Schicht 19	45	0,62	1,21	0,91
Schicht 20	34	0,43	1,15	0,86
Schicht 21	23	0,35	1,07	0,74
Schicht 22	23	0,44	1,06	0,77
Ansteh. Lehm	47	0,42	1,27	0,87

5.5. Probennahme und Laboruntersuchungen

5.5.1. Probennahme

Die Beprobung erfolgte auf folgende Weise:

Probenarten:

- Mit einem Messing-Ausstechzylinder des Durchmessers 2,5cm wurden Erdproben aus der Profilwand entnommen und sofort in Quarz-Probenbehälter mit Rauminhalt $8,55\text{cm}^3$ verfüllt. Diese Proben wurden für die Messung der Suszeptibilität, der NRM und der IRM herangezogen (zu den Messungen siehe auch Anhang 1).
- Zudem wurde loses Probenmaterial entnommen und luftdicht in einem Kunststoffbeutel verpackt. Mit diesem Material erfolgten die Messungen an der VFTB.

Beprobungsstellen:

- Im Grabenbereich wurde die Grabenmitte senkrecht in Abständen von 10 cm mit dem Ausstechzylinder beprobt (siehe auch Abbildung 5.11.). Durch den gleichmäßigen Abstand der Proben erhielten wir hier 1-3 Proben je Schicht, je nach deren Mächtigkeit.
- Zusätzlich wurden im Graben- sowie im Wallbereich Probenmaterial aus „schichttypischen Stellen“ aller identifizierten Schichten entnommen, und zwar jeweils zwei Einzelproben mit dem Ausstechzylinder sowie zusätzlich loses Bodenmaterial; vgl. hierzu Tabellen 5.1. und 5.2.

Anmerkungen:

- Der rezent angelegte Drainagegraben (Schicht 2) wurde beprobt und die Messungen der Suszeptibilität und NRM durchgeführt. Weitergehende Messungen erfolgten an diesem Probenmaterial jedoch nicht, da aufgrund der Verfüllung mit einer inhomogenen Mischung aus Bodenmaterial verschiedener Schichten keine verwertbaren Ergebnisse zu erwarten waren.
- Schicht 10, eine kleinräumige bronzzeitliche Grubenverfüllung unter dem Wall, wurde versehentlich nicht beprobt, daher liegen hier keine Ergebnisse vor. Eine spätere Beprobung war nicht mehr möglich.

5.5.2. Untersuchungsstrategie

Schwerpunkte in den Laboruntersuchungen lassen sich setzen im Hinblick auf

- die Art,
- die Korngrößen oder
- die Konzentration

der magnetischen Minerale.

Die vorliegende Arbeit untersucht vor allem die Frage nach den positiven oder negativen Anomalien, welche bei den Magnetometerprospektionen an Viereckschanzen und hier insbesondere im Grabenbereich gemessen wurden. Dies kann zurückgeführt werden auf die relative „Stärke“ des magnetischen Signals an den einzelnen Messpunkten der Prospektionsfläche.

Daher dominieren Untersuchungsformen, welche die relativen Konzentrationen magnetischer Minerale sowie die Art der beteiligten Eisenoxide mit ihren natürlichen erreichbaren Werten der remanenten und induzierten Magnetisierung in den Vordergrund stellen. Gemessen wurden die Suszeptibilität, NRM, IRM, Hysteresekurven, Backfield und thermische Erhitzungs- und Abkühlkurven.

5.5.3. Suszeptibilität, NRM und IRM

Dieser Abschnitt befasst sich mit den Labormessungen an den mit dem Ausstechzylinder entnommenen 8,55cm³-Proben. Das lose Probenmaterial wurde an der VFTB untersucht, siehe Kapitel 5.5.4.

Die Messung der magnetischen Suszeptibilität erfolgte im gesteins- und paramagnetischen Labor der Universität München in Niederlippach an der Kappabridge. NRM und IRM wurden im selben Labor am Kryogenmagnetometer bestimmt.

Die schrittweise Erzeugung der IRM erfolgte (nach vorangehender Messung der NRM und darauf folgender Wechselfeld-Entmagnetisierung in drei Raumrichtungen) am Pulse Magnetiser MMPM-9 bis zu einem Maximalwert von 2370 mT.

Näheres zu den Messgeräten und –verfahren siehe Anhang 1.

Die Messwerte finden sich auf der beiliegenden CD auf der Excel-Datei „Papferding Labor Auswertungen“. Die wichtigsten Messergebnisse sind auch in Anhang 2 abgebildet.

5.5.3.1. Bereich des ehemaligen Walles

Bei diesen Proben wurden Messungen der Suszeptibilität und der NRM durchgeführt. IRM-Messungen liegen von der VFTB vor, siehe hierzu Kapitel 5.5.4.

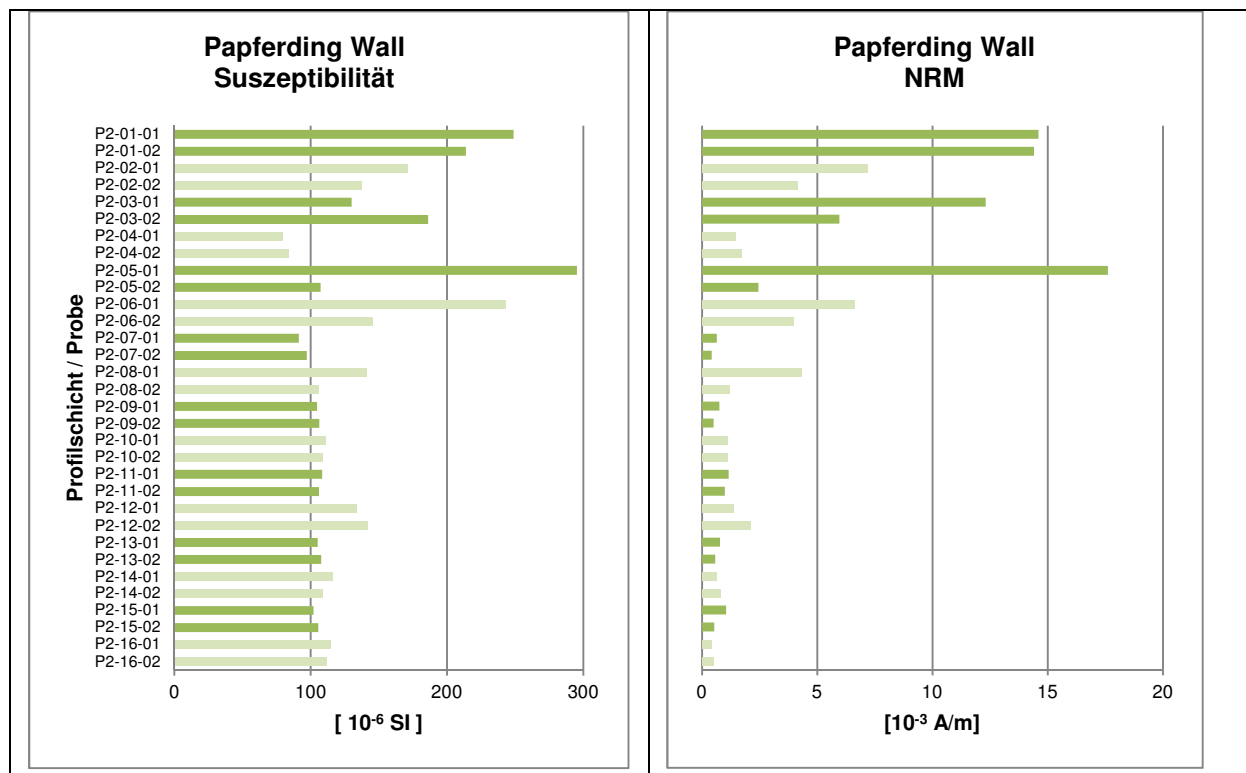


Abb. 5.13.: Viereckschanze Papferding, jeweils 2 schichttypische Proben aus Wallbereich. Ergebnisse der Laboruntersuchungen: Magnetische Suszeptibilität und NRM.

Ergebnisse:

- Die höchsten Werte der Suszeptibilität und der NRM wurden erwartungsgemäß in der obersten Bodenschicht 1, sowie in den Brandschichten Nr. 5 und 6 ermittelt. Auch die Verfüllung des Drainagegrabens, Nr. 2, enthält vermutlich Oberbodenmaterial und zeigt relativ hohe Messwerte.
- Auch in Schicht Nr. 3, die als Restwallschüttung identifiziert wurde, sind die magnetischen Werte deutlich erhöht. In dieser Schicht befinden sich Reste von Holzkohle, somit sind Feuerstellen auf der Bodenoberfläche vor der Errichtung des Walles anzunehmen.

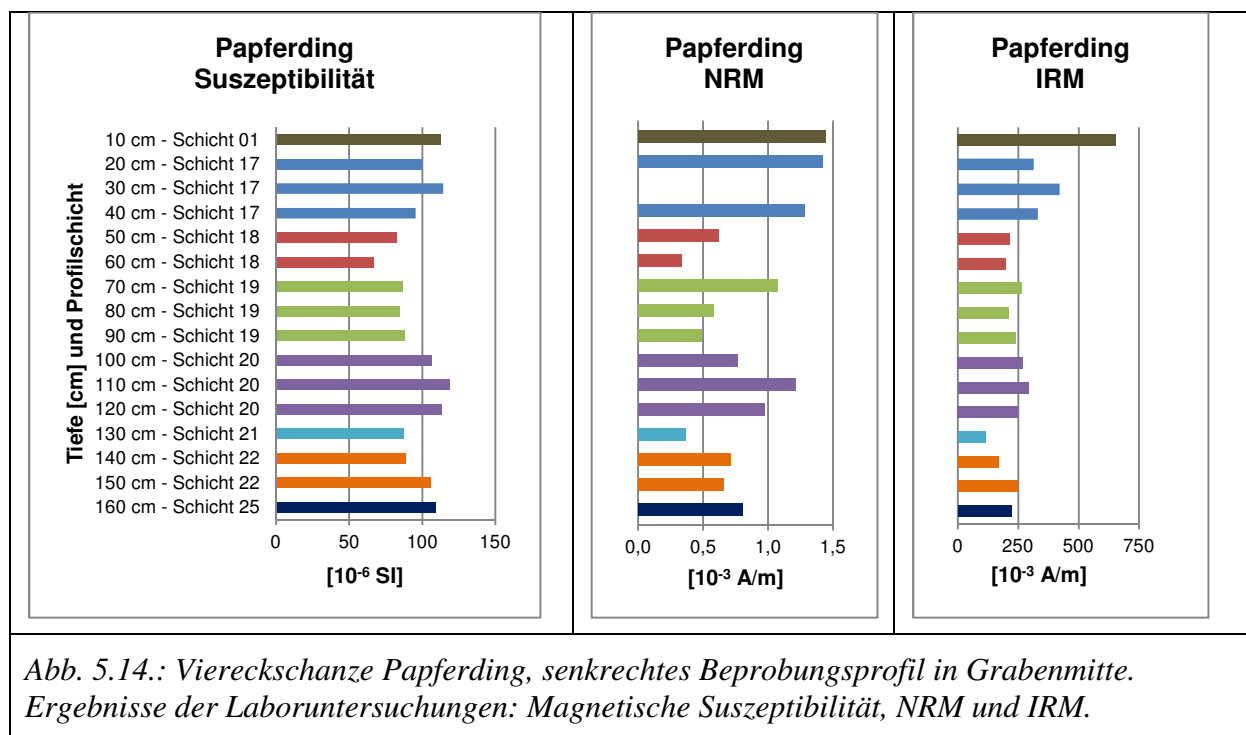
- Im Vergleich zu den oberen Schichten 1-6 zeigen die bronzezeitlichen Verfüllungsschichten 7-12 und der anstehende Lehmuntergrund in der Suszeptibilität mäßig, in der NRM stark erniedrigte Werte, die von hier an relativ gleich bleiben. Dabei treten aber leicht erhöhte Werte in den Verfüllungsschichten 8 und 12 auf, was auch hier auf den vereinzelt Gebrauch von Feuer hinweist. Allerdings erreichen die Werte bei weitem nicht den Level der Brandschicht 5 mit der in der Grabung identifizierten Ofenstruktur (siehe Abb. 5.9.b/c).

5.5.3.2. Bereich des ehemaligen Grabens

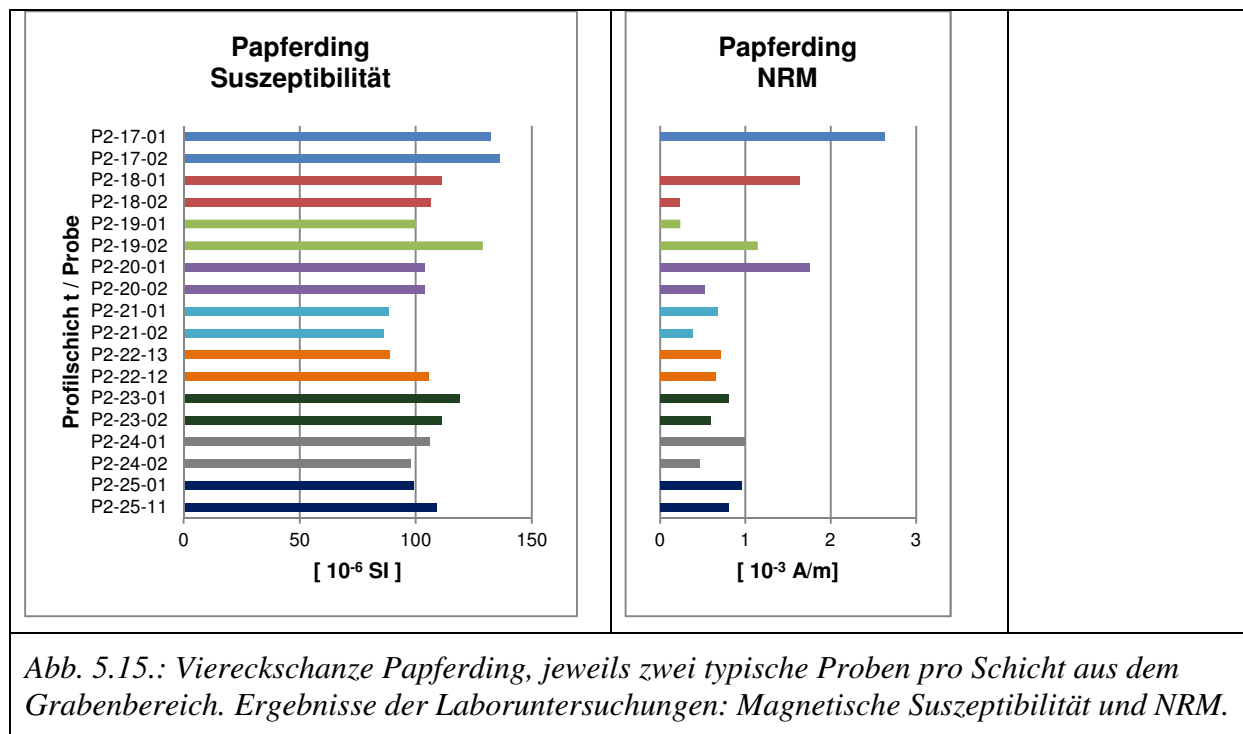
Anmerkungen zu den Messungen:

- Eine Messung der IRM bei den $8,55\text{cm}^3$ -Proben wurde nur an den äquidistant aus der Grabenmitte entnommenen Proben durchgeführt. Zu den schichttypischen Stellen aus dem Grabenbereich allgemein liegen IRM-Messungen an der VFTB vor, siehe hierzu Kapitel 5.5.4.
- Bei der Aufprägung der IRM konnte keine vollständige Sättigung der Proben erreicht werden, was vermutlich auf paramagnetische Anteile oder möglicherweise auch auf einen gewissen Gehalt an Goethit hindeutet. Bei der Erstellung der Grafik wurde jeweils der Wert bei der eingesetzten maximalen Feldstärke von 2370 mT verwendet.
- Die Schichten 23 und 24 sind hier nicht enthalten, da diese nicht mittig im Hauptgraben, sondern etwas seitlich versetzt Richtung Wall lagen.

Äquidistante Proben in Grabenmitte:



Schichttypische Proben, über den Grabenbereich verteilt:



Ergebnisse:

- Die IRM ist erwartungsgemäß bei der obersten Schicht 1 (Oberboden) am höchsten, da hier im Allgemeinen die meisten ferro(i)magnetischen Minerale vorhanden sind. Suszeptibilität und NRM stechen bei Schicht 1 weniger klar heraus.
- Die Abnahme der IRM-Werte von oben nach unten ist deutlich ausgeprägt, mit einem Minimum im Reduktionshorizont / Schicht 21.
- Die Probe bei 30 cm Tiefe / Schicht 17 wies einen abnorm hohen NRM-Wert von $3,03 \cdot 10^{-3}$ A/m auf, bei normalen Werten der Suszeptibilität und IRM. Eine weitere Probe aus dieser Schicht (Nr. P2-17-02) hat ebenfalls einen extrem hohen Wert der NRM ($8,84 \cdot 10^{-3}$ A/m). Messfehler könnten zwar vorliegen, sind aber angesichts ihres Auftretens innerhalb derselben Schicht unwahrscheinlich.

Allerdings ist zu bemerken, dass es sich bei der Schicht 17 um eine rezente Grabenverfüllung im Zuge der Flurbereinigung handelt. Wie die Auswertung des Magnetogramms (Abb. 5.3. bzw. Abb. 5.4., Nr. 2) zeigt, wurde im Graben teilweise auch stark magnetisches Material wie etwa Bauschutt eingefüllt. Auch an den Entnahmestellen der beiden angesprochenen Proben könnte sich ortsfremdes Material mit einer extrem hohen NRM befinden. Da diese Werte aber hier nicht die hier gegebenen Bodenverhältnisse zu repräsentieren scheinen und um die grafische Darstellung nicht unnötig zu verzerren, wurden sie in den Abb. 5.14. und 5.15. weggelassen, weshalb dort die entsprechenden Linien fehlen.

- Die Werte der NRM sind stärker gestreut als die der Suszeptibilität.
- Die Suszeptibilität zeigt hier bei der Untersuchung der Bodenproben ab Schicht 18 abwärts ein ähnliches Verhalten wie die in Kapitel 5.4.2. erwähnten Feldmessungen. Die niedrigsten magnetischen Werte liegen in Schicht 18 (ehemaliger Oberboden bis in die 1950er Jahre) und Schicht 21 (graublaue, am stärksten reduzierte Schicht). Eine Ausnahme bildet hier nur die NRM der Probe P2-18-01.

5.5.3.3. Interpretierender Vergleich von Graben- und Wallbereich

Aus den Daten der Kapitel 5.5.3.1. und 5.5.3.2. lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die ursprüngliche, ungestörte Bodenschichtung am Untersuchungsort umfasste die Schichten (1,) 4, 14, 15, 16. Unter dem Wall blieb dieser Schichtenaufbau (abgesehen von den bronzezeitlichen Gruben) über lange Zeiträume erhalten, im Grabenbereich wurde er beim Bau der Viereckschanze aber zerstört. Den latènezeitlichen Oberbodenhorizont bildete wohl die Schicht 4, da über ihr der einige Zentimeter mächtige Wallrest identifiziert werden konnte.
- Auch die einzelnen bronzezeitlichen Grubenverfüllungen griffen, im Hinblick auf die Bildung oder Umformung von Eisenoxiden, offensichtlich nicht gravierend in die ursprüngliche Bodenbeschaffenheit ein. Eine Ausnahme bildet hier natürlich insbesondere Schicht 5, die stark holzkohlehaltige Brandschicht, die sich durch verziegelten Lehm und Anteile von Gefäßkeramik auszeichnet und sich magnetisch durch höhere Werte abbildet.
- Die Erhaltung des „klassischen“ Bodenaufbaus unter dem Wall spiegelt sich auch in der deutlichen Abnahme der Suszeptibilität und der NRM von oben nach unten (bzw. umgekehrt: dem Anstieg der Werte in den oberen Bodenschichten) wider, wie sie auch in ungestörten Böden zu beobachten ist. Dabei ist aber anzumerken, dass der heutige Oberboden unter dem Wall ja lange Zeit von letzterem überdeckt war, was seine natürliche Entwicklung beeinträchtigte.
- Sowohl im Graben als auch unter dem Wall liegen die Werte der Suszeptibilität im unteren Drittel der Untersuchungsfläche bei etwa $100 \cdot 10^{-6}$ SI, die NRM zwischen $0,5 \cdot 10^{-3}$ A/m und $1 \cdot 10^{-3}$ A/m; diese Werte sind also vergleichbar hoch.
- Ein deutlicher Unterschied zeigt sich jedoch im Oberboden, wo im Grabenbereich bei der Suszeptibilität nur $130 \cdot 10^{-6}$ SI erreicht werden (unter dem Wall: $230 \cdot 10^{-6}$ SI); die NRM in der obersten Schicht des Grabens beträgt etwa $1,4 \cdot 10^{-3}$ A/m, ist aber unter dem Wall mit $14 \cdot 10^{-3}$ A/m sogar zehnmal so hoch.
- Mit diesen Messwerten ist bei einer Magnetometerprospektion lokal mit einer negativen Anomalie im Graben gegenüber dem Wall zu rechnen. Über den Vergleich der Messwerte mit dem Innen- oder Außenraum der Viereckschanze lassen sich dabei aber keine direkten Aussagen treffen, da diese Bereiche nicht von der Grabung erfasst wurden.

In den folgenden weiteren Laboruntersuchungen an der VFTB soll nun die Ursache für diese lokale negative Anomalie des Viereckschanzengrabens ermittelt werden.

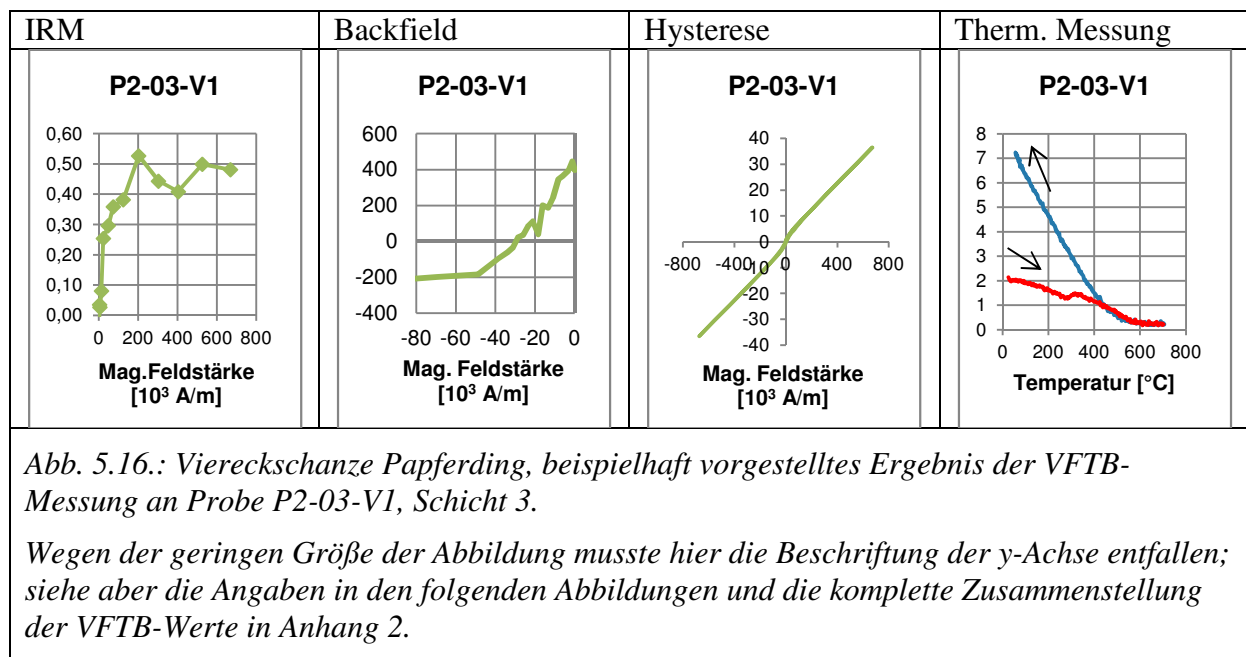
5.5.4. Messungen an der VFTB

5.5.4.1. Qualität und Aussagekraft der Messergebnisse

An der VFTB (Variable Field Translation Balance), bzw. dem VFTB-Gerät in Niederlippach und den beiden Geräten am Institut für Geophysik in München, wurden folgende Messungen durchgeführt (Einzelheiten zu Geräten und Messparametern siehe Anhang 1):

- IRM, Backfield und Hysterese wurden unmittelbar nacheinander gemessen.
- Für die thermische Messung wurde frisches Material der gleichen Probe verwendet. Die Probe wurde vor der Messung mit einem starken Feld aufmagnetisiert. Während des Verlaufs von Erhitzung und Abkühlung selbst war nur ein kleines Feld angelegt, um den paramagnetischen Einfluss möglichst gering zu halten.

Abb. 5.16. zeigt zunächst einen kompletten VFTB-Messzyklus am Beispiel der Probe P2-03-V1 aus Schicht 3. Wichtige Ergebnisse sind in den Abbildungen 5.17. und 5.18. dargestellt, darüber hinaus sind sämtliche Ergebniskurven im Anhang 2 zu finden („Papferding Überblick über Labormessungen VFTB“).



Ergebnisse:

- Die Werte der IRM- und der Backfield-Messungen zeigen meistens starke Schwankungen im Kurvenverlauf, vermutlich wirkte sich hier die geringe Probenmenge (je nach verwendetem Gerät und Probenhalter ca. 220-550 Milligramm) am stärksten negativ aus. Dennoch sind die Backfield-Werte in den Ergebnistabellen Nr. 5.4. und 5.5. unter Vorbehalt eingetragen. Die IRM-Werte wurden nicht zur näheren Interpretation herangezogen, sind aber im Anhang 2 sowie in der Datenzusammenstellung auf der beiliegenden CD enthalten.
- Die Hysteresekurven haben durchweg einen relativ „glatten“ Verlauf. Auffällig ist, dass alle Kurven einen sehr starken, oft sogar einen ausschließlich paramagnetischen Anteil zeigen; daher können die Kurven gut zur qualitativen Abschätzung des Verhältnisses von paramagnetischen zu ferro(i)magnetischen Mineralanteilen

herangezogen werden. Aufgrund der extrem schmalen Kurvenform erscheint es aber fraglich, ob die Ermittlung der typischen Hysteresegrößen (siehe Abbildung 2.2.) hier sinnvolle Ergebnisse liefern kann. Die Größen wurden versuchsweise anhand der Software „Rock Mag Analyzer“ ermittelt und zur Korngrößenermittlung in einem Day Plot abgebildet, der ausschließlich Korngrößen im PSD-Bereich anzeigte; der Plot wurde aber wegen fraglicher Zuverlässigkeit nicht in der Arbeit verwendet.

- Als aussagekräftigstes Ergebnis der VFTB-Messungen erwies sich die thermische Messung mit Aufheizen der Proben bis 700°C und anschließender Abkühlung. Der Verlauf der Magnetisierung der Proben während des thermischen Zyklus, die Ermittlung von Curietemperaturen (siehe Kap. 2.3.2.2.) aus den Messkurven und deutlich erkennbare chemische Mineraländerungen bei der Erhitzung lieferten die wichtigsten Hinweise zur Auswertung dieser Messungen. Dabei erwies es sich als hilfreich, den Erhitzungsprozess in einem gesonderten Graphen darzustellen.
- Als Fazit dieser Überlegungen werden für die folgenden Darstellungen die thermischen Kurven (Aufheizen und Gesamtzyklus) sowie die Hysteresekurven bevorzugt.

5.5.4.2. Typische Ergebniskurven der VFTB-Messungen

Abbildung 5.17. zeigt typische Ergebniskurven der VFTB-Messungen für den Bereich unter dem ehemaligen Wall der Viereckschanze; in Abbildung 5.18. sind die entsprechenden Kurven für den Grabenbereich abgebildet.

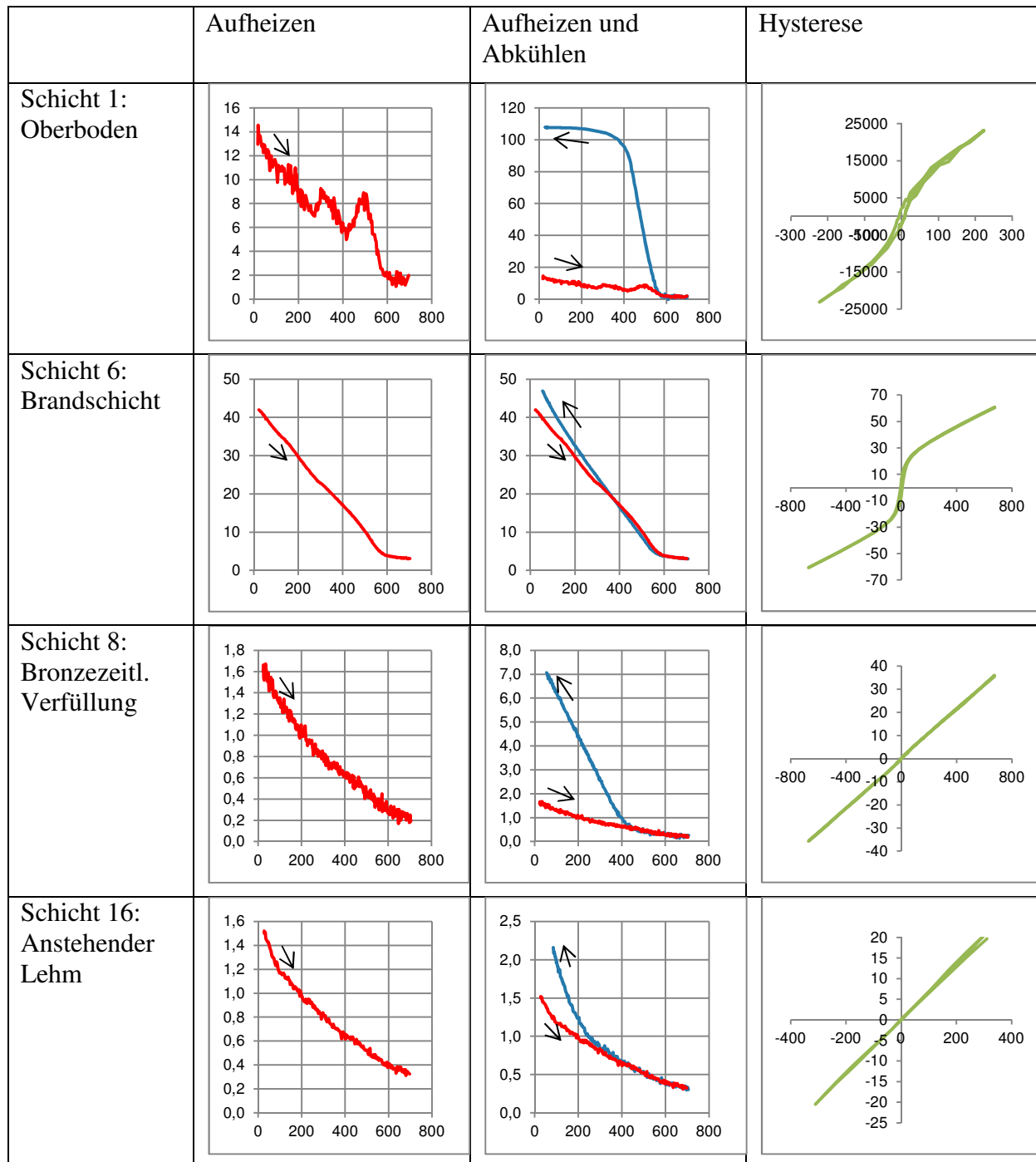


Abb. 5.17.: Viereckschanze Papferding, typische VFTB-Kurvenverläufe unter dem ehemaligen Wall der Viereckschanze.

Thermische Kurven:

x -Achse: Temperatur [$^{\circ}\text{C}$], y -Achse: Mag.Moment / Gewicht [$10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$].

Hysterese:

x -Achse: Mag. Feldstärke [10^3 A/m], y -Achse: Mag.Moment / Gewicht [$10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$].

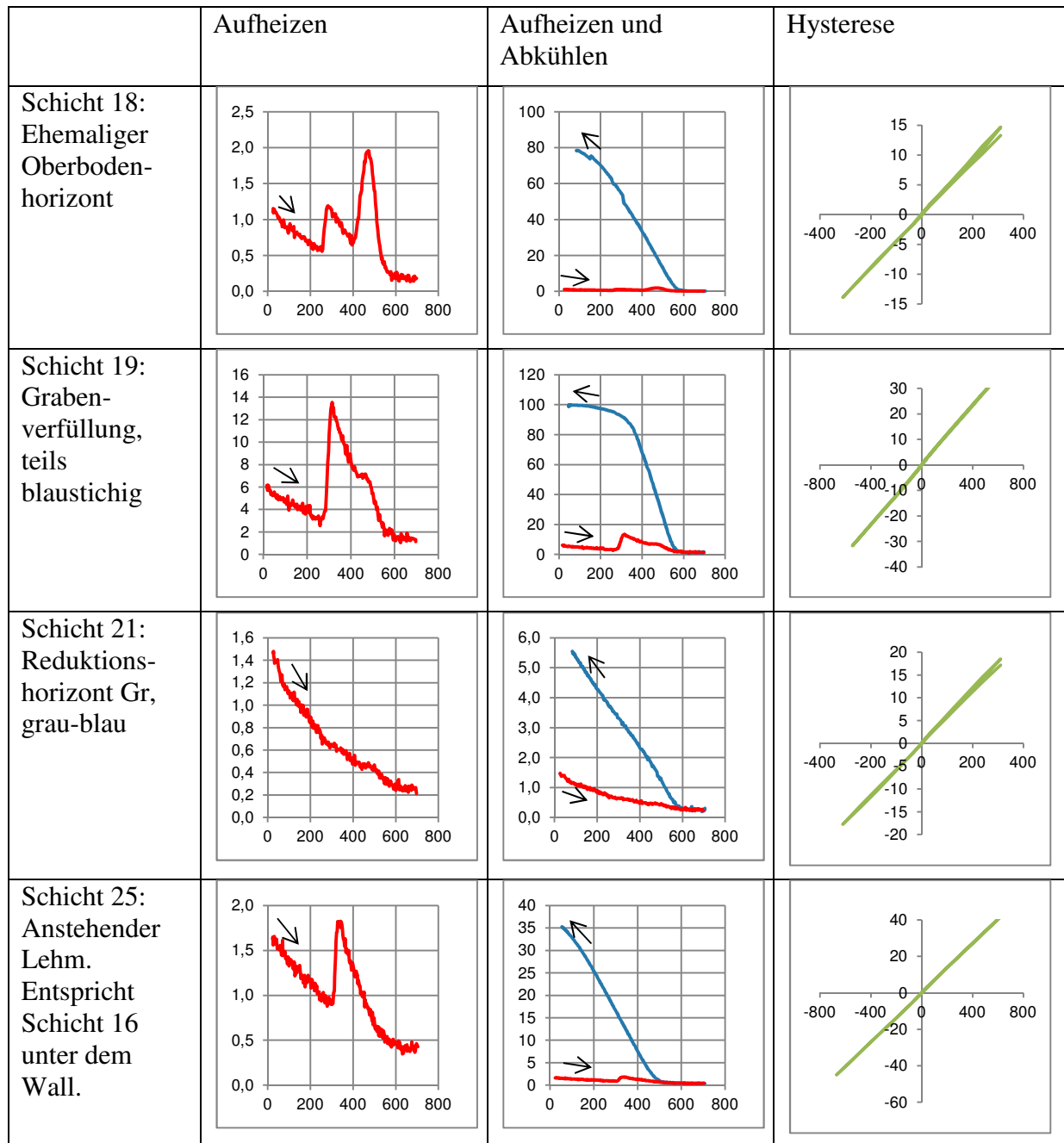


Abb. 5.18.: Viereckschanze Papferding, typische VFTB-Kurvenverläufe aus dem Grabenbereich der Viereckschanze.

Thermische Kurven:

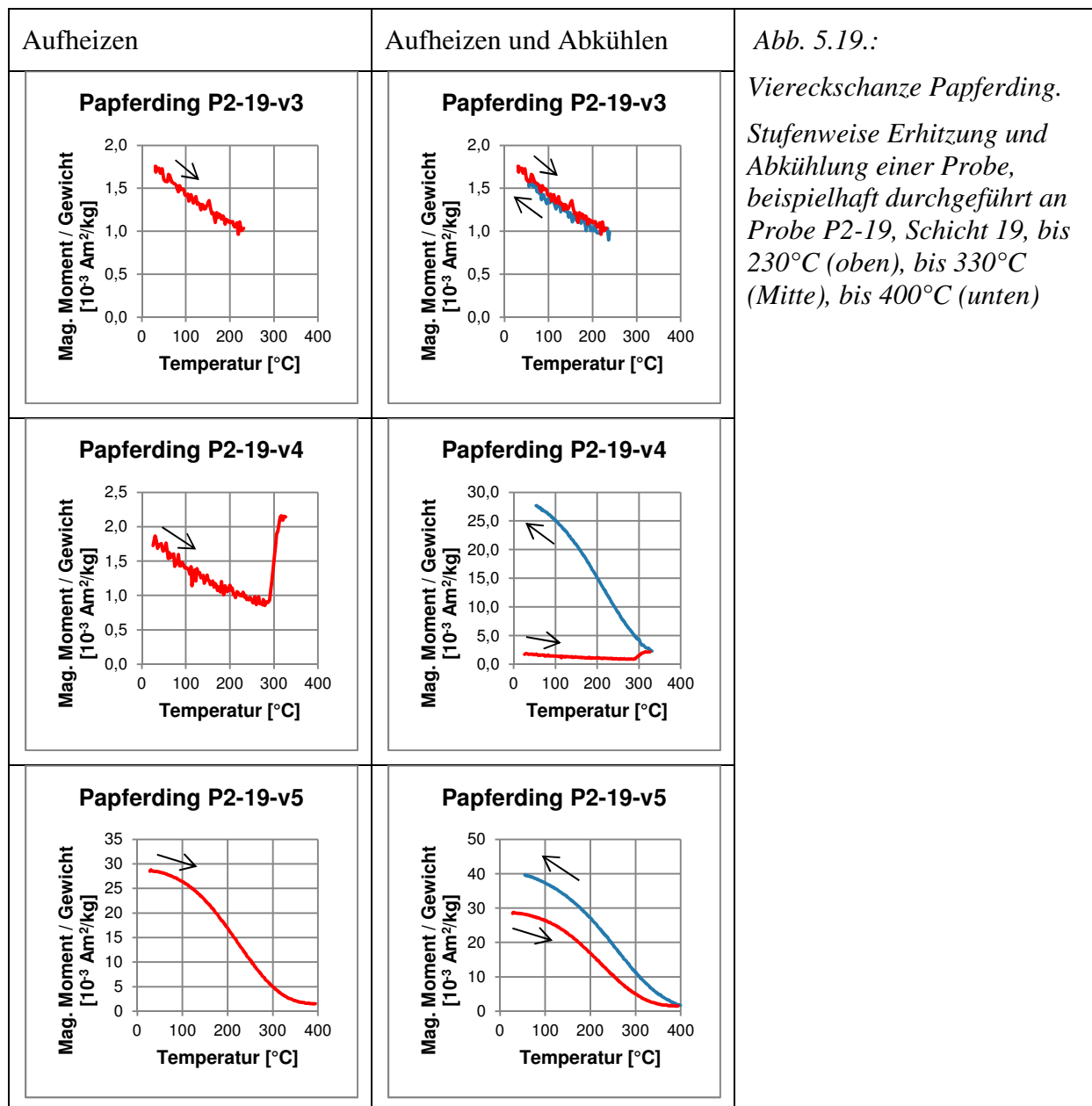
x-Achse: Temperatur [°C], y-Achse: Mag.Moment / Gewicht [$10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$].

Hysterese:

x-Achse: Mag. Feldstärke [10^3 A/m], y-Achse: Mag.Moment / Gewicht [$10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$].

Eine dieser Proben (P2-19, Schicht 19) wurde exemplarisch einer stufenweisen Erhitzung und Abkühlung in verschiedenen Temperaturstufen unterzogen, hierbei wurde stets dieselbe Probe im Messgerät belassen.

Abbildung 5.19. zeigt das Ergebnis dieser Untersuchung mit dem sprunghaften Anstieg des magnetischen Moments bei 280°C und der damit belegten irreversiblen chemischen Änderung.



Ergebnisse (siehe auch die Ergebnistabellen 5.4. und 5.5. sowie die kompletten VFTB-Kurven in Anhang 2):

- Die Hysteresekurven zeigen für die meisten Schichten (nahezu) rein paramagnetisches Verhalten der beteiligten Minerale. Kurvenverläufe, die neben einem dominierenden paramagnetischen auch ferrimagnetische Anteile erkennen lassen, findet man nur im Oberboden sowie im Brandhorizont 6, in schwachen Andeutungen auch in den Schichten 3 und 5.
- Die in archäologischen Böden insbesondere im Grabenbereich oft festgestellte Anreicherung von Magnetit (siehe Kapitel 2.3.3.1.; FABBINDER [1994]) konnte hier also nicht festgestellt werden, was mit der fehlenden positiven Grabenanomalie im Magnetogramm (Abbildung 5.3.) korreliert.
- Paramagnetische Minerale können nicht direkt anhand ihrer magnetischen Eigenschaften bestimmt werden. Bei der thermischen Behandlung der Proben wurden allerdings

in den meisten Fällen durch die unterschiedlichen Verläufe von Aufheiz- und Abkühlkurven chemische Mineraländerungen festgestellt, welche indirekte Schlüsse auf das Ausgangsmaterial zulassen.

- In der thermischen Kurve zeigt nur die Probe aus Schicht 6 (Brandschicht) ähnliche Kurven beim Aufheizen und Abkühlen, hier hat nahezu keine Mineraländerung stattgefunden. Die Curietemperatur lässt auf Magnetit schließen.
- Bei allen anderen Proben müssen während des Aufheizens chemische Umsetzungen stattgefunden haben. Verschiedene Kurventypen können unterschieden werden:
 - Die Aufheizkurve zeigt keine erkennbaren Peaks, die Abkühlkurve steigt ab etwa 300 °C (Schichten 9, 16) oder ab 450 - 500 °C verstärkt an (Schichten Nr. 5, 7, 8, 11, 12, 14, 20, 22, 23).
 - Die Aufheizkurve zeigt einen einzelnen deutlich erkennbaren Peak mit einem Anstieg zwischen 280 und 330°C, die Abkühlkurve steigt bei einer Temperatur von etwas oberhalb von 500°C verstärkt an (Schichten 3, 24, 25, 26).
 - Die Aufheizkurve zeigt zwei deutlich erkennbare Peaks mit Anstiegen in den Temperaturbereichen zwischen 280 und 330°C sowie 420 bis 500°C und einem dazwischen liegenden Abfall. Die Abkühlkurve steigt ab 570-580°C sehr stark an (Schichten 1, 18, 19).
 - Nicht jede Probe lässt sich klar einer dieser Gruppen zuordnen, so ist z. B. bei Schicht 17 ein möglicher zweiter Peak nur angedeutet.
- Obwohl die unteren Bodenschichten 16 (Wallbereich) und 25 (Graben) ursprünglich dieselbe Schicht bildeten, hat ihre Lage in verschiedenen archäologischen Bereichen der Viereckschanze offensichtlich den Chemismus des Eisens in unterschiedlicher Weise beeinflusst.
- Bei den Betrachtungen der Curietemperaturen ist Vorsicht geboten, da nach PÉTRONILLE [2009] bei mikroskopischen Untersuchungen von Bodenproben aus Papferding TiO_2 -Anteile in unterschiedlicher Konzentration nachgewiesen werden konnten. Für reinen Magnetit ist ein T_C -Wert von 580°C bekannt, in der Titanomagnetitmischreihe $\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$ nimmt die Curietemperatur aber annähernd linear mit steigendem Titangehalt x ab. Nach AKIMOTO ET AL. [1957] würde einem Titananteil von $x=0,1$ eine Curietemperatur von etwa 520°C entsprechen. Auch bei Hämatit bewirkt eine teilweise Substitution der Fe- durch Ti-Ionen eine Erniedrigung der Curietemperatur (ISHIKAWA [1962]). Zum Titangehalt in Böden und speziell in Tonmineralen siehe auch SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL [2010], S. 24.
- Die verwendeten Probenhalter aus Quarzglas ließen die Farbe des Probenmaterials vor und nach der thermischen Behandlung jeweils gut erkennen. In fast allen Fällen änderte sich die Farbe von der vorherigen typischen Farbe der Bodenschicht zu grau bis dunkelgrau mit einem mehr oder weniger breiten rostroten Bereich an der Ober- bzw. Außenseite der Probe, die mit Quarzwolle verschlossen war und einen gewissen Zutritt von Sauerstoff ermöglichte. Dies lässt darauf schließen, dass während der thermischen Behandlung in der Probe sowohl reduzierende als auch oxidierende Zonen vorhanden waren.

5.5.4.3. Ergebnisse der VFTB-Messungen für Wall- und Grabenbereich

In den folgenden beiden Tabellen 5.4. (ehemaliger Wallbereich) und 5.5. (Grabenbereich) sind die Ergebnisse der VFTB-Messungen in tabellarischer Form zusammengestellt.

Nr	Bezeichnung	Hysterese					Back-field	Thermische Kurven			
		Rein paramagnetisch	Nahezu rein paramagnetisch	Minimaler ferro(i)mag. Ant.	Schwacher ferro(i)mag. Ant.	Starker ferro(i)mag. Anteil		Feldstärke während der Messung [10^3 A/m]	Erhitzungsspeak: beginnender Anstieg / Peak bei etwa... (Temperatur)	Anstieg des mag. Moments im Verlauf des Messzyklus: Verhältnis [%]	Bemerkung
1	Rezenter Pflughorizont / Oberbodenhorizont (Ah)					x	-27	80	280-330°C 420-500°C !	836 %	Kühlphase: starker Anstieg ab 570°C
3	Restwellschüttung, keltisch			x			-29	24	280-330°C	368 %	Kühlphase: starker Anstieg ab 500°C
4	Stark gefleckter Staunässe-Horizont	x					-49	24	(280-330°C)	262 %	Kühlphase: starker Anstieg ab 400-500°C
5	Bronzezeitliche Verfüllung / Brandschicht			x			-33	24	---	257 %	Kühlphase: Anstieg ab ca. 570°C
6	Bronzezeitliche Verfüllung / Brandschicht					x	-17	332	(280-330°C) (420-500°C)	114 %	Kühlphase: Anstieg ab ca. 570°C
7	Bronzezeitliche Verfüllung	x					-53	24	---	507 %	Kühlphase: starker Anstieg ab 420°C
8	Bronzezeitliche Verfüllung		x					25	---	453 %	Kühlphase: starker Anstieg ab 420°C
9	Bronzezeitliche Verfüllung	x						24	---	162 %	Kühlphase: Anstieg ab 200-250°C
11	Bronzezeitliche Verfüllung	x					-56	24	---	860 %	Kühlphase: starker Anstieg ab 420°C
12	Bronzezeitliche Verfüllung		x					25	(320-500°C?)	414 %	P2-12-2 Kühlphase: starker Anstieg ab 420°C
13	Wurzelgang		x					26	---	109 %	Kühlphase: leichter Anstieg ab ca 200°C
14	Anstehender Lösslehm	x					-46	24	---	147 %	Kühlphase: leichter Anstieg ab ca. 200-400°C (?)
15	Stauwasser führende Schicht	x					-57	24	---	155 %	Kühlphase: leichter Anstieg ab ca. 200-300°C (?)
16	Anstehender Lösslehm	x					(-50)	24	---	144 %	Kühlphase: Anstieg ab ca. 200-300°C

Tab. 5.4.: Viereckschanze Papferding. Zusammenstellung der Ergebniswerte der VFTB-Messungen im ehemaligen Wallbereich.

Nr	Bezeichnung	Hysterese					Back-field	Thermische Kurven			
		Rein paramagnetisch	Nahezu rein paramagnetisch	Minimaler ferro(i)mag. Ant.	Schwacher ferro(i)mag. Ant.	Starker ferro(i)mag. Anteil		Feldstärke während der Messung [10^3 A/m]	Erwärmungsspeak: beginnender Anstieg / Peak bei etwa... (Temperatur)	Anstieg des mag. Moments im Verlauf des Messzyklus: Verhältnis [%]	Bemerkung
1	Rezenter Pflughorizont / Oberbodenhorizont (Ah)					x	-27	80	280-330°C 420-500°C !	836 %	Kühlphase: starker Anstieg ab 570°C
17	Jüngste Grabenverfüllung (nach Flurbereinigung)		x				-33	24	280-330°C ! (400-450°C)	831 %	Kühlphase: starker Anstieg ab 500°C
18	Ehemaliger Oberbodenhorizont	x					-52	24	260-290°C ! 400-450°C !	6542 %	Kühlphase: starker Anstieg ab 570°C
19	Grabenverfüllung		x				-63	80	280-330°C ! (400-450°C)	1629 %	Kühlphase: starker Anstieg ab 570°C
20	Grabenverfüllung		x				(-55)	24	---	337 %	Kühlphase: starker Anstieg ab 500°C
21	Grabenverfüllung. Reduktionshorizont Gr	x						24	(400-450°C)	388 %	Kühlphase: starker Anstieg ab 580°C
22	Grabenverfüllung		x				-33	24	---	295 %	Kühlphase: Anstieg ab 500°C
23	Reste einer weiteren Grabenspitze?	x					-46	24	---	314 %	Kühlphase: Anstieg ab 500°C
24	Reste einer weiteren Grabenspitze?		x				-18	333	280-330°C	303 %	Kühlphase: Anstieg ab 500°C
25/ 16	Anstehender Lösslehm. Entspricht Schicht 16 unter dem Wallbereich.								280-330°C !		Kühlphase: Anstieg ab 500°C
26	Schichtgrenze vom Lösslehm zur Grundmoräne	x						24	280-330°C ! (400-450°C)		Kühlphase: Anstieg ab 500°C

Tab. 5.5.: Viereckschanze Papferding. Zusammenstellung der Ergebniswerte der VFTB-Messungen im ehemaligen Grabenbereich.

5.5.4.4. Mögliche chemische Mineraländerungen während der thermischen Untersuchungen

Chemische Umsetzungen zwischen Eisenoxiden im Boden sind generell vielfältiger Natur. Sie sind abhängig von einer Reihe von Faktoren wie Ausgangsmaterial, Bodenfeuchte, Durchlüftung bzw. oxidierenden oder reduzierenden Bedingungen, pH-Wert, der Menge bzw. Geschwindigkeit der Anlieferung von freiem Fe^{2+} und dem Vorhandensein oder Fehlen von organischer Substanz. Nahezu jedes Eisenoxid kann in Abhängigkeit von den passenden Bedingungen in zwei oder mehr andere Oxide umgewandelt werden (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL [2010]).

Auch die Mineralumbildungen bei thermischen Untersuchungen werden durch die Sauerstoffzufuhr und insbesondere den Gehalt an organischer Substanz bestimmt (HANESCH ET AL. [2006]).

Mögliche, im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit relevante Prozesse sind:

- Die Umwandlung von Lepidokrokit in Maghemit bei 200-280° in Luft.
- Die Umwandlung von Ferrihydrit in Maghemit und, bei weiterer Temperaturerhöhung, teilweise in Hämatit.
- Die Umwandlung von Lepidokrokit oder Hämatit in Magnetit durch Reduktion.
- Die Umwandlung von Maghemit in Hämatit, in einem weiten Temperaturbereich von 370°C bis 600°C.
- Die Umwandlung von Goethit zu Hämatit, welche sich ohne organisches Material zwischen 250 und 400°C vollzieht.
- Die Umwandlung von Goethit bei Vorhandensein von organischem Material zu Maghemit bei 420°C, welcher sich dann im Fall von synthetischem Goethit ebenfalls in Hämatit umwandelt; bei natürlichem Goethit kann der letztere zweite Schritt entfallen.

Goethit ist dabei ein häufiges und stabiles Eisenoxid in unseren Böden. Auch Ferrihydrit und Lepidokrokit kommen oft vor: Ferrihydrit bei schneller Oxidation von Fe^{2+} -Ionen, die sich mit der Zeit in stabilere Minerale umwandeln, und Lepidokrokit vor allem in reduzierenden Böden. Siderit ist seltener und tritt eher in feuchter und eisenreicher Umgebung auf.

Organische Materie bewirkt reduzierende Bedingungen bei der Erhitzung. Eisen(hydr)oxide verwandeln sich in Maghemit und Magnetit ab 200-280°C, Goethit ab etwa 450°C. Die Starttemperatur ist abhängig von der Menge der organischen Substanz und der Aufheizrate.

5.5.4.5. Interpretation

Anhand der beobachteten thermischen Aufheizkurven und den Überlegungen zu möglichen Mineralumwandlungen lässt sich folgendes sagen:

Der oft beobachtete Anstieg der Magnetisierung der Proben ab 280°C lässt sich mit der Umwandlung des paramagnetischen Lepidokrokit oder Ferrihydrit in den ferrimagnetischen Maghemit erklären. Eine weitere Transformation in Hämatit würde die Magnetisierung dann wieder abschwächen. Wegen der deutlich rostroten Fleckung in den unteren Bodenschichten, die bei der Grabung festgestellt wurden, ist die Anwesenheit von Lepidokrokit eher anzunehmen als die des dunkelgrauen Ferrihydrit (vgl. Abbildungen 5.6. bis 5.8. sowie die Bodenfärbungen in Abbildung 2.3.).

Der zweite Anstieg der magnetischen Messwerte ab 420°C könnte der Umwandlung von Goethit in Maghemit geschuldet sein.

Bei der Abkühlung der Proben stieg die Magnetisierung ab etwa 570°C stark an. Der hohe Wert würde zu Maghemit passen, allerdings liegt dessen Curietemperatur mit 590-675°C normalerweise darüber. Für diese Temperaturerniedrigung könnte der festgestellte Titangehalt des Bodens verantwortlich sein. Eine weitere mögliche Erklärung ist aber auch, dass sich der Umwandlungsprozess hin zu Hämatit fortgesetzt hat, und der starke Anstieg bei 570°C einem weiteren Prozess, nämlich der reduktiven Umwandlung von Lepidokrokit oder Hämatit in Magnetit, entstammt.

Auffällig ist, dass die doppelten oder einzelnen Peaks nur in Proben bestimmter Grabungsbereiche auftreten: Beim Bereich unter dem Wall sind es die oberflächennahen Schichten 1 und 3, evtl. auch 4. Im Graben zeigen die oberen Schichten 17-19 sowie die untersten Schichten 24-26 Peaks, jedoch nicht die grauen bis graublauen, unter reduzierendem Einfluss stehenden Schichten.

Ein Reduktionshorizont ist wegen des stark wasserstauenden Pseudogleybodens im gesamten Grabungsbereich zu finden, er beginnt unter dem ehemaligen Wall ab etwa 1,30 m Tiefe. Im Graben ist der reduzierte Bereich deutlicher ausgeprägt als unter dem Wall. Er zeigt eine starke graublaue Färbung und liegt wannenförmig im Grabenbereich zwischen etwa 60 cm und 150 cm Tiefe (Abb. 5.6., 5.7., Tab. 5.1. und 5.2.).

Magnetit wird unter reduktiven Bedingungen leicht aufgelöst (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL [2010], S. 339); das gelöste Eisen liegt dann in mobiler Form als Fe^{2+} vor und kann in tiefere Bodenschichten ausgeschwemmt werden. Unterhalb des Reduktionshorizonts, welcher in Schicht 21 seine deutlichste Ausprägung zeigt, ist bei wechselnden Austrocknungs- und Feuchtephasen auch zeitweilige Durchlüftung gegeben. Dieses zeitweise oxidative Milieu bewirkt die Ausfällung des Bodeneisens in neue Minerale.

Da die Peaks bei 280 °C in den thermischen Kurven auch in den oberhalb der Hauptreduktionszone liegenden Schichten 17-19 auftreten, kann davon ausgegangen werden, dass auch im oberen Grabenbereich durch temporäre Stauwasserepisoden immer wieder reduzierende Bedingungen vorliegen, die zur Auflösung des Magnetit führen. Somit würde auch in den oberen Grabenteilen bei deren zeitweiliger Austrocknung und damit verbundener erneuter Sauerstoffzufuhr genügend freies Fe^{2+} als Ausgangsmaterial zur Ausfällung von Lepidokrokit vorliegen.

Somit lässt sich folgendes Fazit ziehen:

Der in archäologischen Böden erwartete Magnetit ist hier nur in den obersten Bodenschichten in geringer Menge zu finden. Nach seiner reduktiven Auflösung und der Ausschwemmung des mobilen Fe^{2+} in tiefere Bodenschichten bilden sich dort bei zeitweilig vorliegenden oxidativen Bedingungen neue Eisenminerale wie Ferrihydrit und Lepidokrokit. Der geringe Gehalt an Eisenmineralen würde eine röntgenografische Identifizierung nicht ermöglichen. Auch mit gesteinsmagnetischen Mitteln lassen sich diese paramagnetischen Minerale nicht selbst, aber indirekt als Ausgangsprodukte bestimmter chemischer Umwandlungen bei thermischen Untersuchungen nachweisen. Insbesondere Lepidokrokit wurde hier durch die Peaks in den thermischen Messkurven und anhand der deutlich rostroten Bodenfärbung belegt. Dieser Umwandlungszyklus der Bodeneisenminerale bewirkt also die Auflösung des ferri-magnetischen Magnetit insbesondere im wasserstauenden Grabenbereich und Neubildung des paramagnetischen Lepidokrokit, weshalb in den magnetometrischen Messungen keine positive Anomalie mehr gemessen werden kann.

Kapitel 6. Gelände- und Labormessungen – Fehmbach

6.1. Überblick über örtliche Gegebenheiten und die beiden Prospektionen

Die Viereckschanze von Stephansposching-Fehmbach liegt in Niederbayern im Landkreis Deggendorf und wurde als Vertreterin ihrer Gattung auf Schotterboden ausgewählt. Den Untergrund bilden die von einigen Dezimetern Lehm überdeckten würmzeitlichen Kiese der Hochterrasse der Donau, welche heute etwa 1400 Meter nördlich der Schanze liegt.

Der westliche Bereich der Schanze war durch Kiesabbau nach einer vorausgegangenen dokumentierten Grabung bereits zerstört (SCHMOTZ [2002]; siehe Abb. 6.1.). Der Abbaubereich hatte sich bereits wieder mit Grundwasser gefüllt.



Abb. 6.1.: Viereckschanze Fehmbach, Luftbild aufgenommen während der Grabung der Westhälfte im Jahr 2000. Blick von Süden. Eingezeichnet sind die Prospektionsflächen vom Mai 2008 (1) und November 2008 (2).

BLfD Luftbildnummer 7142_141_8316_22 vom 16.10.2000. Fotograf: Klaus Leidorf.

Da für die Osthälfte nun ebenfalls Kiesabbau geplant war, wurde im Jahr 2008 die Grabung auf diesen Bereich erweitert. Im Zusammenhang hiermit konnten auf dieser Fläche zwei Magnetometerprospektionen durchgeführt werden: Einmal vor Beginn der Grabung am 29. Mai 2008, sowie ein zweites Mal während der laufenden Grabung am 11. November 2008 (BERGHAUSEN [2009]; BERGHAUSEN [2010a]). Dadurch bot sich hier die seltene Gelegenheit, ein archäologisches Denkmal zunächst über dem unveränderten, ehemals landwirtschaftlich genutzten Boden und einige Monate später nach Abschiebung des Oberbodens erneut zu prospektieren, und somit den Einfluss des Oberbodens auf die Messung zu klären. Zudem war es möglich, im Verlauf der archäologischen Grabung Bodenproben aus verschiedenen

Grabenbereichen der Viereckschanze zur weiteren Analyse zu entnehmen sowie in situ Suszeptibilitätsmessungen durchzuführen.

Der quer durch den oberen Bildteil verlaufende Feldweg entspricht gleichzeitig der Kante zur Niederterrasse der Donau. Dabei ist im Bereich der Bäume ein Abbruch von etwa zwei Metern Höhe festzustellen. Östlich des Strauchwerks verläuft der Geländeabfall sanfter, vermutlich wurde er wegen der landwirtschaftlichen Bearbeitung teilweise verflacht.

Die beiden Prospektionsflächen sind aufgrund äußerer Gegebenheiten nicht deckungsgleich: Fläche Nr. 1 orientierte sich an Feldgrenzen und konnte wegen des hohen Bewuchses im Mai nicht auf die nördlich gelegene Niederterrasse ausgeweitet werden; Fläche Nr. 2 war durch die laufende Grabung und geöffnete Flächen begrenzt. Sie wurde auf den nördlich des Weges liegenden Bereich ausgedehnt, um möglicherweise die bislang unbekannte nördliche Begrenzung der Anlage zu prospektieren.



Abb. 6.2.: Viereckschanze Fehmbach, Foto der Grabung im November 2008, von Süden aus gesehen.

Der rechts auf halber Bildhöhe direkt sichtbare Grabenschnitt (4) ist der Schnitt G-H im Ostgraben; Schnitt E-F (5) verläuft diagonal durch die Ecke, Schnitt C-D im Südgraben liegt im linken Bildteil (6).

Foto: J. Faßbinder.



Abb. 6.3: Viereckschanze Fehmbach, Foto der Grabung im November 2008, von Nordosten aus gesehen.

Die zweite Magnetometerprospektion verlief über den Graben der Viereckschanze und das Gräbchen östlich davon.

Zum Zeitpunkt der zweiten Prospektion war der Oberboden auf der gesamten Untersuchungsfläche bis auf Pflugtiefe bereits abgetragen; im Bereich des Grabens (Abb. 6.2., 1 und 6.3., 1) und der Flächen außerhalb der Viereckschanze (Abb. 6.3., 2) war zusätzlich der unter dem Pflughorizont liegende Verwitterungslehm bis auf den anstehenden Schotter abgetragen. Hier ist auch die linienhafte Abraumhalde des Lehms (Abb. 6.2., 3 und 6.3., 3) gut erkennbar, die im Magnetogramm deutlich nachzuweisen ist.

6.2. Magnetometerprospektionen

6.2.1. Die erste Magnetometerprospektion: Über unverändertem Boden

Die erste Magnetometerprospektion wurde am 29. Mai 2008 durchgeführt. Die Fläche lag brach und war von schnell wachsendem Unkraut bedeckt, das nach dem wenige Tage vorher erfolgten Mähen bereits wieder eine Höhe von bis zu 80 cm aufwies. Dieser Bewuchs konnte nicht kurzfristig erneut gemäht werden und wurde unmittelbar vor der Messung mit Hilfe eines Traktors flach gedrückt. Eventuell auftretende Fahrspuren und lineare Unterschiede der Bodenverdichtungen wirkten sich aber nicht störend auf die Ergebnisse aus.

Das Magnetogramm (Abb. 6.4.) zeigt mehrere archäologische Befunde, die teilweise durch den Stand der Grabung im November mittlerweile als Gruben verifiziert werden konnten und im Interpretationsplan (Abb. 6.5.) mit eingearbeitet sind.

Besonderes Augenmerk lag bei der Auswertung der ersten Prospektion auf dem Grabenverlauf. Der östliche Graben der Viereckschanze zeigt sich als positive Anomalie (Abb. 6.4., 1) und ist anhand des Messbildes gut nachzuvollziehen. Für die genaue Bestimmung der südöstlichen Wallecke (Abb. 6.4., 2) sowie des Verlaufs des Südgrabens (Abb. 6.4., 3) muss jedoch der Grabungsplan mit herangezogen werden. Der Südgraben zeigt sich unerwartet als negative Anomalie im Magnetogramm. Vor allem an der nördlichen, dem Schanzeninneren zugewandten Grabenkante ist die negative Anomalie sehr deutlich ausgeprägt, während an der südlichen Grabenkante, also zum außerhalb der Schanze liegenden Bereich, die Anomalie verschwimmt. Eine Erklärung für diesen sehr ungewöhnlichen Effekt liefern die Suszeptibilitätsmessungen am Grabenschnitt C-D, siehe Kap. 6.3.3. sowie Abb. 6.7.

6.2.2. Die zweite Magnetometerprospektion: Nach Abtragung des Oberbodens

Hier fällt zunächst deutlich auf, dass die bei einer archäologischen Prospektion nahezu immer vorhandenen, kleinen punktuellen Störungen im Magnetogramm nur nördlich des Weges (Abb. 6.4., 10) auftreten. Dieser Bereich wurde nicht in die Grabung einbezogen, daher war hier der Oberboden auch bei der zweiten Prospektion unverändert erhalten. Südlich des Weges jedoch, also auf der Grabungsfläche, war der Oberboden vor der Prospektion bereits entfernt worden, und hier treten diese punktuellen Störungen nicht auf. Damit wird sehr deutlich, dass diese Störungen aus den oberen Bodenschichten kommen und vermutlich durch kleine eisenhaltige Schrotteilchen verursacht werden.

Der Graben der Viereckschanze (Abb. 6.4., 1) ist durch die Entfernung des Oberbodens besser im Magnetogramm zu erkennen als vorher. Auch die Abraumhalden der dem Kies aufliegenden Lehmschicht (Abb. 6.4., 7; vgl. Abb. 6.2., 3 und 6.3., 3) sind klar nachweisbar. Einige schon bei der Messung im April schwach erkannten Befunde (z. B. Abb. 6.4., 8) können nun

Gruben zugeordnet werden, während mögliche Pfostenstellungen eines weiteren Gebäudes (Abb. 6.4., 9) erst nach der Abtragung des Oberbodens sichtbar wurden (vgl. Interpretationsplan, Abb. 6.5).

Im Magnetogramm ebenfalls eingezeichnet sind die Lagen der mittels Suszeptibilitätsmessungen untersuchten Profilschnitte G-H durch den Ostgraben (Abb. 6.2., 4 und 6.4., 4), E-F diagonal durch die südöstliche Grabenecke (Abb. 6.2., 5 und 6.4., 5) und C-D durch den Südgraben (Abb. 6.2., 6 und 6.4., 6), siehe hierzu auch Kap. 6.3.

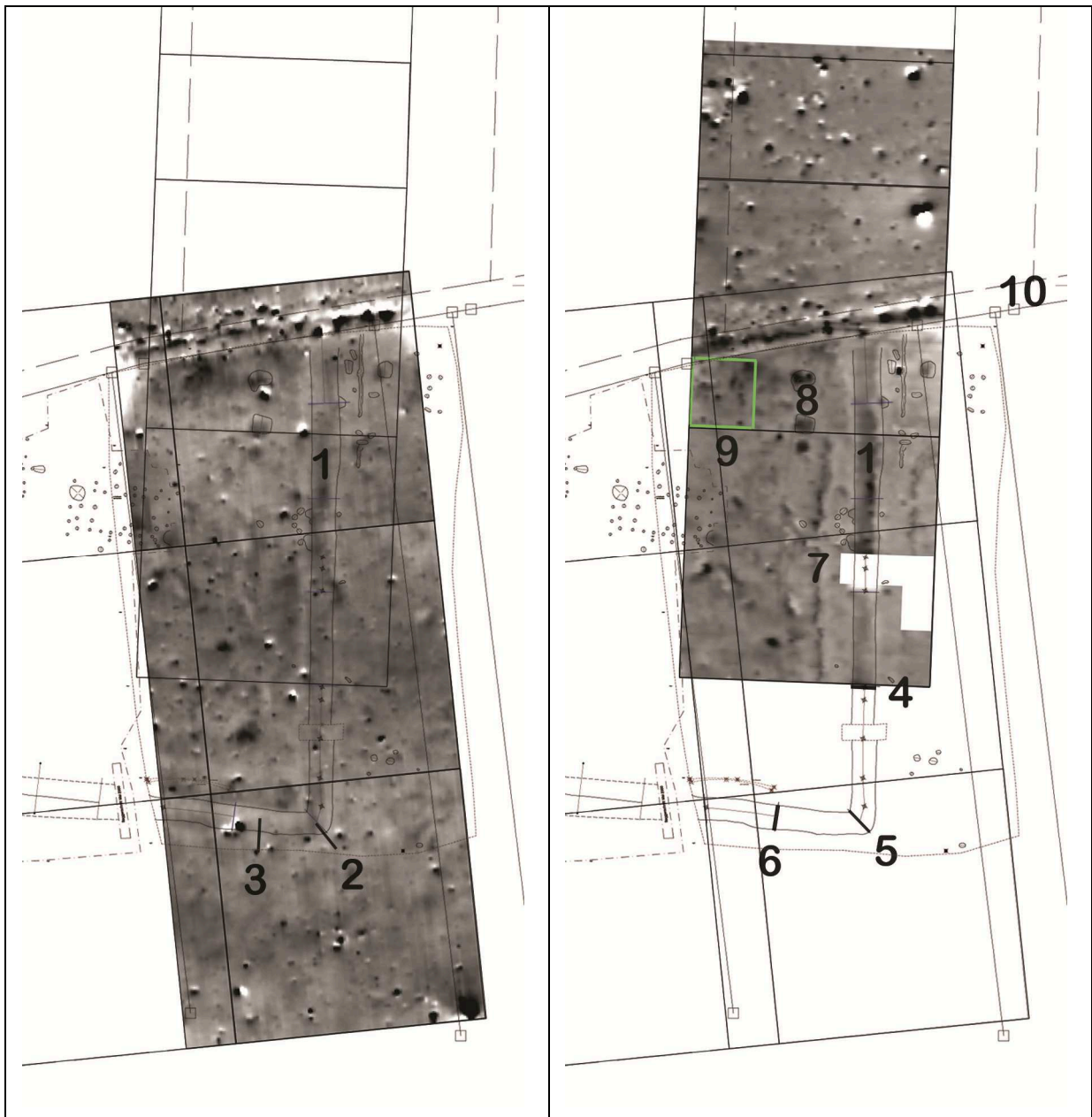


Abb. 6.4.: Viereckschanze Fehmbach. Magnetogramm der ersten Prospektion im Mai (links) sowie der zweiten Prospektion vom November (rechts), jeweils überlagert mit dem Grabungsplan.

Scintrex Smartmag SM4G-Spezial, Dynamik: ± 5 nT (links) bzw. ± 8 nT (rechts).

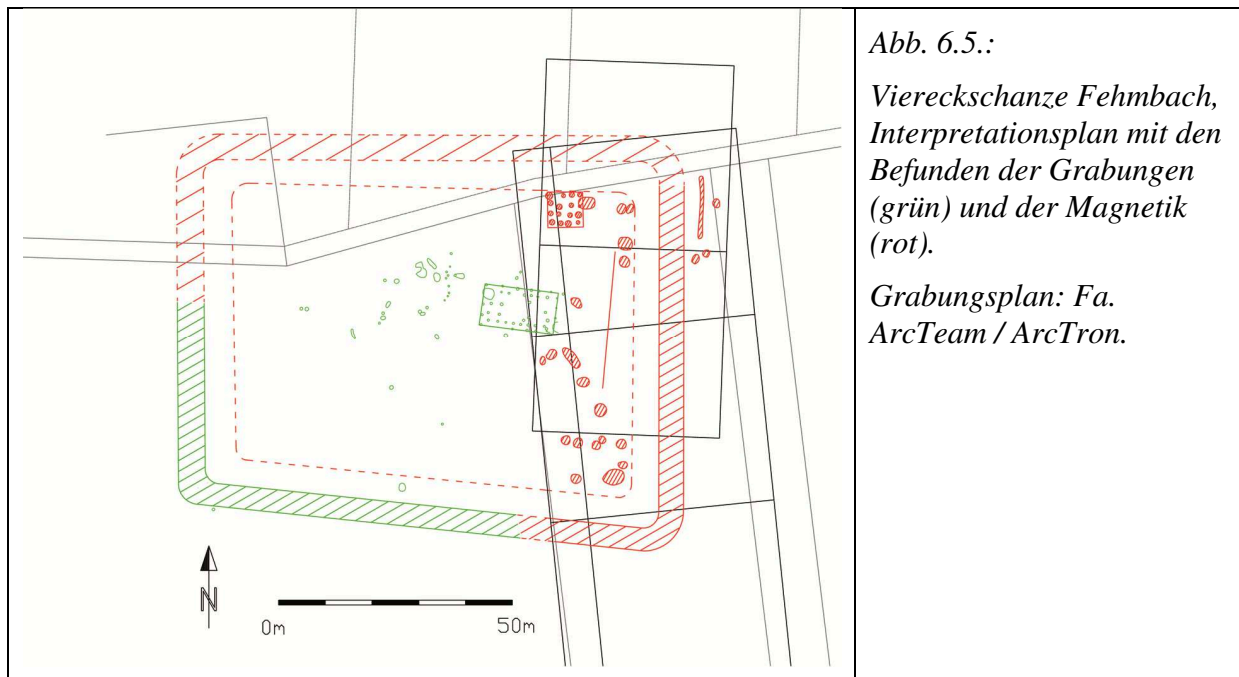
Grabungsplan: Fa. ArcTeam / ArcTron.

6.2.3. Interpretation der Magnetometerprospektionen

Abbildung 6.5. zeigt den Interpretationsplan der Viereckschanze, der anhand der Grabungen und der Magnetometerprospektionen erarbeitet wurde. Der Graben ist hierbei schraffiert dargestellt, der innen liegende ehemalige Wallbereich durch eine punktierte Linie umgrenzt.

Der Plan enthält neben dem bereits durch die erste Grabung freigelegten zentralen Großgebäude auch ein Eckgebäude, welches durch das Magnetogramm der zweiten Prospektion an dieser Stelle zu vermuten ist.

Der Verlauf des nördlichen Grabens konnte nicht sicher festgelegt werden, er muss jedoch entweder direkt unter dem Feldweg liegen oder weiter nördlich davon verlaufen. Im ersten Fall wäre sein magnetometrischer Nachweis durch die Störungen des Feldweges beeinträchtigt, im zweiten Fall wäre der Graben vermutlich zum großen Teil schon abgetragen, da das Gelände nördlich des Weges um etwa zwei Meter abfällt. Eine schwache negative Anomalie, welche vom Schnitt des Ostgrabens mit dem Feldweg genau in westliche Richtung führt, könnte jedoch den Verlauf der Grabenspitze noch nachzeichnen; anhand dieser Spur wurde der weitere Grabenverlauf bis zur Verlängerung des Westgrabens hin interpoliert.



6.3. Suszeptibilitätsmessungen an Grabenprofilen


6.3.1. Vorgehensweise

Im Verlauf der Grabung wurde die Grabenverfüllung der Viereckschanze an bestimmten Stellen komplett ausgehoben, teilweise aber auch an Ort und Stelle belassen. Auf diese Weise wurden mehrere Querschnitte durch das Grabenprofil angelegt, siehe Abb. 6.2. sowie Abb. 6.4., Nr. 4-6.

Zur Klärung der wechselnden positiven und negativen Anomalien des Grabenverlaufs im Magnetogramm wurde im Gelände an den Grabenprofilen G-H (Ostgraben), E-F (südöstliche Ecke) und C-D (Südgraben) in einem Messraster von 20 x 20 cm die magnetische Suszeptibilität gemessen, siehe Abbildungen 6.6., 6.7. und 6.8. Das verwendete Messgerät war ein Kappameter SM-30 der Firma ZH Instruments (siehe Anhang 1).

Bei den an einzelnen Messpunkten durchgeführten Wiederholungsmessungen stellte sich heraus, dass eine Veränderung von wenigen Millimetern bei der Positionierung des Kappameters schon ausreichte, um Abweichungen bis zu etwa 30% in den Messwerten zu ergeben. Dies lag an der stark inhomogenen Durchsetzung des Grabeninhalts mit Kiesgestein mit Größen bis zu einigen Zentimetern (zum Verhältnis Boden- zu Gesteinsmaterial siehe Abbildungen 6.6. bis 6.8.). Daher sind die Messwerte generell als Näherungswerte zu verstehen. Zudem traten bei Messungen in der unmittelbaren Nähe von quarzhaltigem Gestein wegen dessen diamagnetischen Verhaltens auch vereinzelte negative Messwerte auf.

Tabelle 6.1. zeigt einige typische Vertreter des kiesigen Inhalts der Grabenfüllung mit Angabe ihrer im Labor gemessenen, teilweise negativen Suszeptibilitätswerte und der jeweiligen Entnahmestelle. Die Schichtbeschreibungen sind in Tabelle 6.3. zusammengefasst.

						
Masse [g]	17,88	40,03	13,19	34,27	37,55	22,38
Suszeptibilität	-0,40	-0,33	6,10	-0,44	-0,26	0,51
Schicht	C-D 2	C-D 2	C-D 5	C-D 5	C-D 5	C-D 5
<i>Tab. 6.1.: Viereckschanze Fehmbach. Typische Gesteinsstücke aus dem Grabenprofil C-D mit den Suszeptibilitäten dieser Einzelsteine und ihren jeweiligen Entnahmeschichten (siehe Tab. 6.3.). Suszeptibilität normiert auf das Gewicht in 10^{-3} kg^{-1}.</i>						

6.3.2. Profil G-H (Ostgraben)

Am Schnitt G-H (Abb. 6.4., 4) hatte das an der Oberfläche gemessene Magnetogramm eine schwach positive Anomalie angezeigt. Bei der Suszeptibilität im Profilschnitt erkennt man klar erhöhte, überwiegend positive Messwerte in den oberen Bodenschichten. Ab einer Tiefe

von etwa 70 cm fallen die Messwerte stark ab, siehe Tabelle 6.2. Ab hier ist in der Höhe des schwankenden Grundwasserstandes im Grabungsfoto (Abb. 6.6.) deutlich eine helle Bodenverfärbung wegen der Auflösung und Ausschwemmung der oberflächennahen Eisenoxide zu erkennen.

cm / cm	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290	310	330	350	370	390	410	430	450	470	490	510
-10	793	441	69	193	134	161	200	156	160	84	76	121	109	89	65	17	-11	15								
-30		107	98	95	182	190	147	93	91	111	122	102	113	83	134	58	73	71	104	74	130	154	144	100	98	136
-50			22	94	64	116	183	152	128	100	120	72	86	90	120	70	120	88	116	157	128	54	102	82	134	99
-70				28	5	26	10	104	98	96	89	70	100	109	106	106	138	125	165	39	109	103	82	54	75	93
-90				33	103	17	33	29	65	46	48	51	46	41	98	66	44	39	80	33	52	54	23	24	59	
-110					53	64	52	55	27	32	32	8	13	48	18	11	25	44	64	63	37	112	24			
-130						69	41	26	15	18	35	-22	26	64	12	33	20	70	46							
-150										46	43	14	69	30	35											

Tab. 6.2.: Viereckschanze Fehmbach. Messwerte der Suszeptibilität (in 10^{-6} SI-Einheiten) aus dem Grabenprofil G-H im Ostgraben.

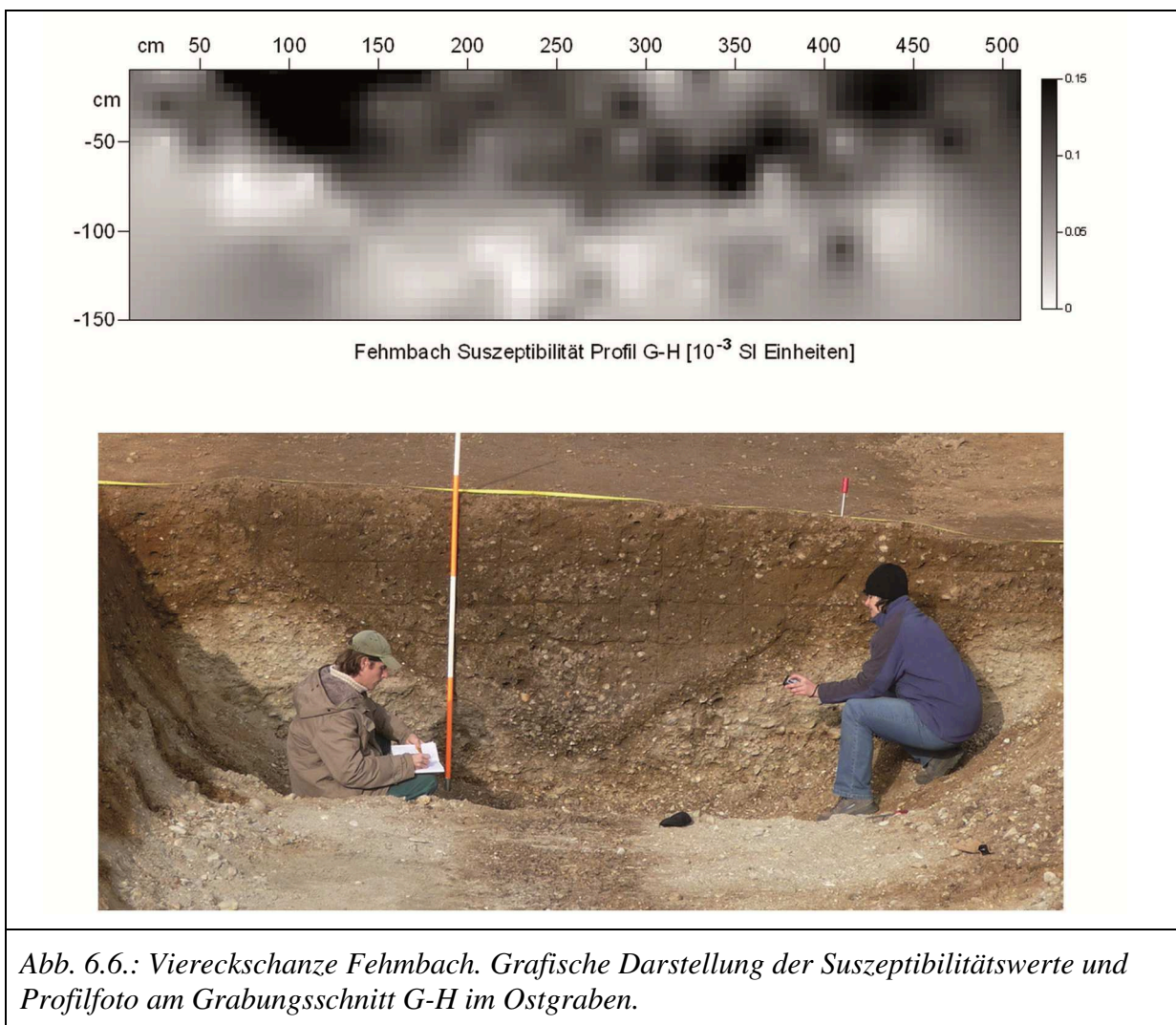


Abb. 6.6.: Viereckschanze Fehmbach. Grafische Darstellung der Suszeptibilitätswerte und Profelfoto am Grabungsschnitt G-H im Ostgraben.

6.3.3. Profil C-D (Südgraben)

Tabelle 6.3. und das Profildfoto in Abbildung 6.7. zeigen die Schichtbeschreibungen des Grabenprofils. In den Tabellen 6.4. und 6.5. und in Abbildung 6.7. sind die Ergebnisse der Suszeptibilitätsmessungen dargestellt.

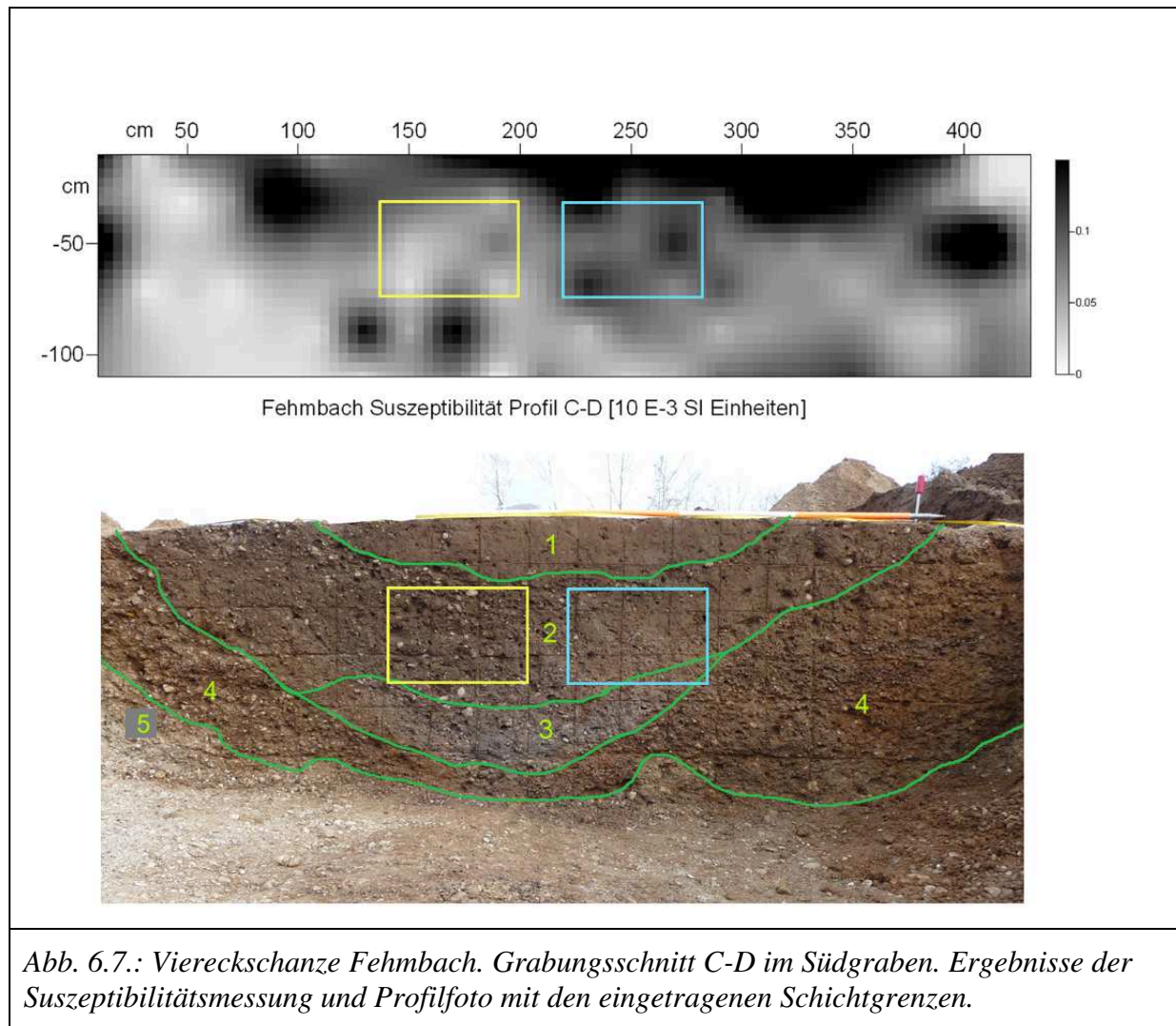
Schicht Nr.	Schichtbeschreibung
Schicht 1	Schluffig-toniges, humoses Feinsediment
Schicht 2	Kies- und Lehmgemisch: von links her eingeflossene Wallschüttung, von rechts eingeflossener Oberboden vom Außenraum der Viereckschanze
Schicht 3	Unterer Grabenbereich, grau-blau reduziert, tonig / sandig
Schicht 4	Anstehender Kies, orange-braun oxidiert
Schicht 5	Anstehender Kies, sandig, hellgrau / weiß

Tab. 6.3.: Viereckschanze Fehmbach. Beschreibung der Schichten des Grabenprofils C-D. Nummern siehe Abb. 6.7.

cm / cm	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290	310	330	350	370	390	410	430
-10	145	17	88	101	115	62	90	104	149	175	188	197	151	209	224	246	181	153	157	135	20	14
-30	76	32	10	59	197	140	108	94	75	47	104	174	89	110	96	215	187	159	109	63	27	18
-50	192	48	35	56	89	75	78	32	48	83	67	80	80	136	77	77	66	83	76	148	231	57
-70		13	29	13	43	41	49	16	79	27	59	136	97	67	105	67	67	46	71	73	77	45
-90				19	26	22	152	45	160	57	50	36	83	74	42	55	68	73	41	33	79	60
-110							24	51	77	10	71	45	29	43	84	96	102	117	72	56	91	70

Tab. 6.4.: Viereckschanze Fehmbach. Grabenprofil C-D, Suszeptibilitätsmessungen. Zahlenwerte der Suszeptibilität (in 10^{-6} SI-Einheiten) in Korrelation mit den Schichten aus Tab. 6.3.

Schicht	Anzahl (N)	Sus-Min	Sus-Max	Ø	<i>Tab. 6.5.: Viereckschanze Fehmbach. Grabenprofil C-D, Suszeptibilitätsmessungen. Angegeben sind jeweils die Anzahl N der Einzelmessungen pro Schicht, die minimalen und maximalen Werte sowie die Durchschnittswerte. Zahlenwerte der Suszeptibilität in 10^{-6} SI-Einheiten.</i>
Schicht 1	8	149	246	192	
Schicht 2	47	16	215	100	
Schicht 3	7	36	83	57	
Schicht 4	59	10	231	64	
Schicht 5	1	13	13	13	



Im Magnetogramm zeigt sich am Schnitt C-D vor allem zum Schanzeninneren hin eine leicht negative Anomalie, während zum Außenraum der Schanze die Anomalie nahezu verschwindet.

Diese Beobachtung kann nun durch die Messung der Suszeptibilität am Profilschnitt erklärt werden: Der linke, d. h. dem Wall zugewandte Teil des Grabens zeigt in seiner Verfüllung insbesondere in Schicht 2 deutlich höhere Kiesanteile als der rechte, dem Außenraum zugewandte Teil. Mit der verstärkten Kiesverfüllung korrelieren durchgehend niedrigere Suszeptibilitätswerte, wie in Abbildung 6.7. an den jeweils linken, gelb umrandeten Rechtecken klar zu erkennen ist. Dies ist durch die negativen Suszeptibilitätswerte der Quarzkiesanteile im Grabenmaterial zu erklären (siehe dazu auch Tabelle 6.1.).

Demgegenüber ist in der rechten Grabenhälfte kein Wallkies, sondern Oberbodenmaterial aus dem Außenbereich der Viereckschanze eingeflossen, was sich an den relativ höheren positiven Suszeptibilitäten niederschlägt (Abbildung 6.7., siehe hier die beiden rechten, hellblau umrandeten Rechtecke).

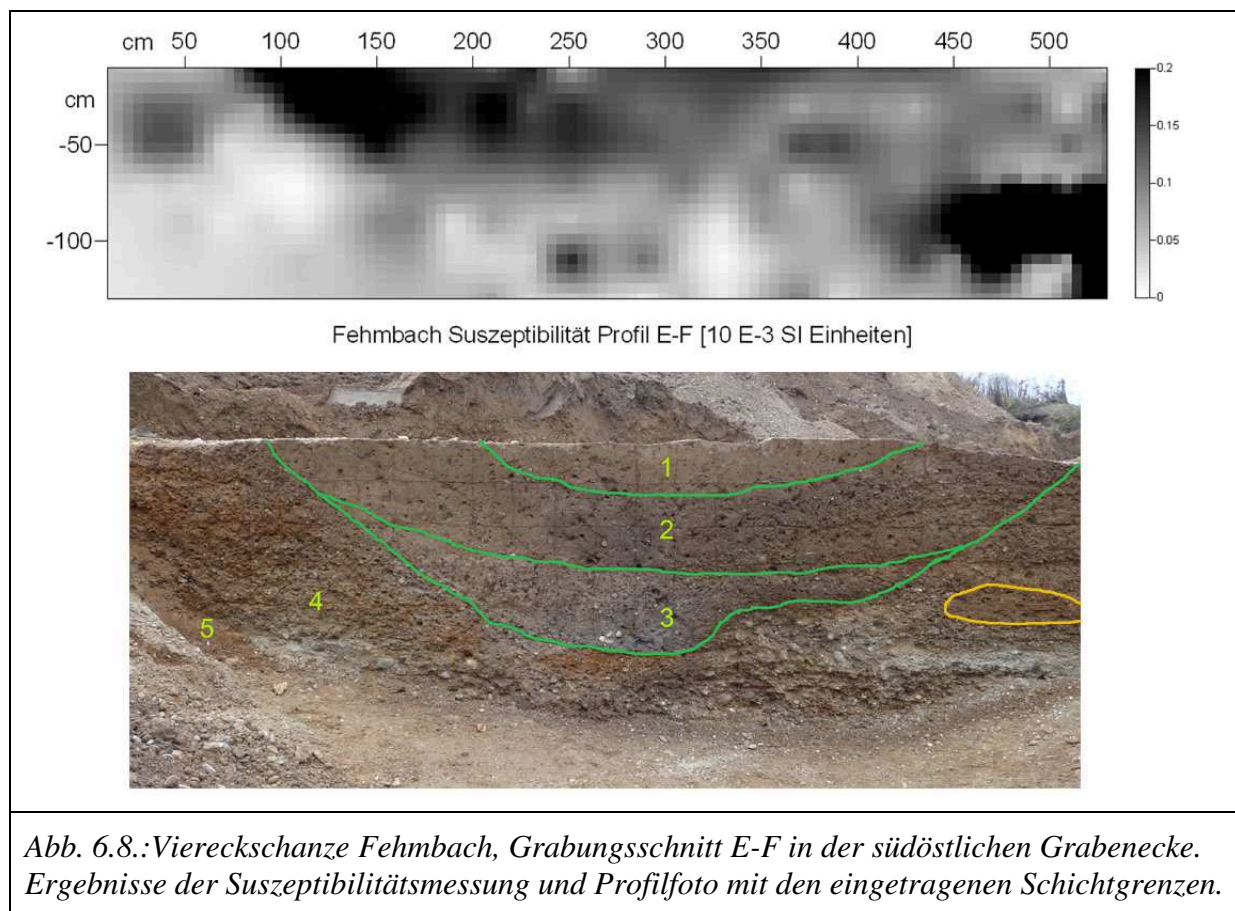
Die oberste Schicht 1 mit der aktivsten Bodenbildungszone und nur geringen Quarzkiesanteilen zeigt erwartungsgemäß die höchste Suszeptibilität, aber auch sie kann den Einfluss der darunter liegenden Kiesschichten und der daraus resultierenden negativen Anomalie im Magnetogramm nicht gänzlich ausgleichen.

6.3.4. Profil E-F (Südöstliche Grabenecke)

Tabelle 6.6. und das Profilfoto in Abbildung 6.8. zeigen die Schichtbeschreibungen des Grabeneckprofils. In Abbildung 6.8. sind zudem die Ergebnisse der Suszeptibilitätsmessungen dargestellt.

Schicht Nr.	Schichtbeschreibung
Schicht 1	Schluffig-toniges, humoses Feinsediment
Schicht 2	Kies- und Lehmgemisch, grau-braun gefleckt: von rechts her eingeflossene Wallschüttung, von links eingeflossener Oberboden vom Außenraum der Viereckschanze
Schicht 3	Unterer Grabenbereich, grau-blau reduziert, tonig / sandig
Schicht 4	Anstehender Kies, orange-braun oxidiert
Schicht 5	Anstehender Sand, orange-braun oxidiert

Tab. 6.6.: Viereckschanze Fehmbach, Beschreibung der Schichten des Grabenprofils E-F. Nummern siehe Abb. 6.8.



Das Profil verläuft diagonal durch die südwestliche Grabenecke, wobei die Wallseite hier rechts im Bild liegt, der Außenraum der Schanze links.

Die ermittelten Suszeptibilitätswerte bestätigen und ergänzen die bei den anderen beiden Profilen gemachten Beobachtungen. Auch hier zeigt sich in den oberen 60 Zentimetern des Profils die hohe Suszeptibilität an der zum Außenraum hin gewandten Seite mit der Verfüllung mit neu entstandenem Oberboden, während sich rechts im Bild der vom Wall her einfließende Quarzkies mit seiner erniedrigten bzw. negativen Suszeptibilität abzeichnet.

Der Bereich hoher Suszeptibilität am rechten unteren Bildrand korreliert mit einer bräunlichen Sandlinse innerhalb des Kiesbereichs (oval umrandet), deren Farbe die Anwesenheit eisenhaltiger magnetischer Minerale, möglicherweise Goethit, nahelegt. Da die Sandlinse nicht beprobt wurde, lassen sich keine weiteren Aussagen über ihre Mineralgehalte oder Entstehungsprozesse treffen. Auf jeden Fall aber muss die Struktur wegen ihrer Lage im ungestörten Kies unterhalb des Grabens älter sein als die keltische Anlage selbst.

6.3.5. Interpretation der Suszeptibilitätsmessungen im Gelände

Archäologisch ist der Prozess der Grabenentwicklung aufgrund der Profiluntersuchungen und der dort durchgeführten Suszeptibilitätsmessungen folgendermaßen zu deuten: Beim Bau der Viereckschanze wurde der Graben angelegt, wobei zeitgleich das ausgehobene Material mit seiner natürlichen Kies- und Lehmzusammensetzung den Wallkörper formte. Im Lauf der Nutzungszeit der Anlage wurde der Wall nach und nach wieder abgetragen, wobei sich sein Material teilweise wieder in den Graben bewegte, und zwar natürlicherweise vor allem in den dem Wall zugewandten Grabenteil.

Ein besonders kompaktes Kiespaket wie in Schicht 2 des Profils C-D deutet darauf hin, dass hier im Südgraben, ob nun vom Menschen beabsichtigt oder aufgrund natürlicher Ursachen, eine größere Menge des kieshaltigen Wallmaterials in einem kürzeren Zeitraum in den Graben rutschte bzw. geschoben wurde. Hier hatte also zu einem gewissen Zeitpunkt eher eine schnelle Verfüllung stattgefunden, ohne dass der natürliche Prozess der Bodenbildung eine größere Menge an Bodenmaterial zwischen den Kiesanteilen ermöglichte. Im Profil G-H im Ostgraben dagegen (siehe Abbildung 6.6.) findet sich eine größere Kiesansammlung nur im unteren Grabenbereich, während in den oberen Grabenteilen eher sich langsam entwickelnde Lehm- bzw. Bodenanteile auftreten, welche mit den höheren Suszeptibilitäten bzw. den positiven Anomalien im Magnetogramm korrelieren. In diesem Sinne ist hier die negative Anomalie im Südgraben also mit einer lokal schnellen Verfüllung mit Wallmaterial in diesem Grabenteil zu deuten. Diese Aussage lässt sich mit gewisser Vorsicht wohl auch auf andere Anlagen auf Kiesuntergrund verallgemeinern, zumindest wenn sich in den Kiesanteilen auch Quarze oder andere Gesteine (wie z. B. Calcit oder Orthoklas) mit sehr niedriger bzw. negativer Suszeptibilität finden (MULLINS [1977]; DUNLOP & ÖZDEMİR [1997]).

6.4. Laboruntersuchungen an Bodenproben

6.4.1. Beprobung

Aus den einzelnen Profilschichten des Profils C-D im Südgraben (Lage siehe Abbildung 6.4., 6; Schichten 1-5) sowie des Profils E-F diagonal durch die Südostecke des Grabens (Lage siehe Abbildung 6.4., 5; Schichten 1-5 analog zu Profil C-D) wurden jeweils etwa 500 Gramm Material der Grabenfüllung entnommen, welches eine für die jeweilige Schicht typische Mischung aus Boden- und Gesteinsbestandteilen enthielt.

Zusätzlich wurde Bodenmaterial von einer deutlich erkennbaren Pfostenstellung („Pfosten 2“) aus einem geöffneten Pfostengrübchen wenige Meter östlich der Nordostecke der Viereckschanze (siehe Abbildungen 6.3. und 6.5.) entnommen. Diese Probe stammt aus einer Tiefe von etwa 15 cm unterhalb des Planums und enthält die Substanz eines mittlerweile völlig zersetzten Holzpfeilers.

Für die weiteren Untersuchungen wurden diese Blöcke zerkleinert, gesiebt und somit in die Fein-, Mittel- und Grobfraction unterteilt. Tabelle 6.7. beschreibt das Probenmaterial.

Bezeichnung	Korngrößen	Beschreibung
Fein	< 0,2 mm	Bodenmaterial sowie natürlich zermahlene Kiesbestandteile
Mittel	0,2mm - 2mm	Bodenmaterial sowie natürlich zermahlene Kiesbestandteile, teilweise verklebt
Grob	2mm - 10 mm	Kiesfraktion (nicht enthalten beim Pfostenmaterial), sowie stark verklebte Bodenbestandteile. Gesteinsanteile, deren Durchmesser 10 mm überstieg, wurden hier nicht mit einbezogen.
<i>Tab. 6.7.: Viereckschanze Fehmbach. Beschreibung des Probenmaterials für die Laboruntersuchungen.</i>		

Das Material wurde in zylindrische Kunststoffdosen mit einem Rauminhalt von etwa 40 cm³ abgefüllt (Innendurchmesser 32 mm, Höhe 50 mm). Wegen des stark inhomogenen Porenraums, insbesondere bei der Grobfraction, wurden die Messwerte hier nicht auf die Dichte, sondern auf die Masse des Probenmaterials normiert.

6.4.2. Suszeptibilitätsmessungen an Bodenproben

Die Messung der Suszeptibilität an den einzelnen Proben erfolgte im Paläomagnetischen Labor der Ludwig-Maximilians-Universität in Niederlippach an der Kappabridge. Einzelheiten zu diesem Gerät und zum Messverfahren siehe Anhang 1; die Messdaten sind in Anhang 2 bzw. auf der beiliegenden CD aufgeführt.

Abbildung 6.9. zeigt die grafischen Darstellungen der Ergebnisse. Dabei sei noch einmal auf die Schichtbeschreibungen in den Tabellen 6.3. und 6.6. hingewiesen: Der Oberboden war bei der Grabung bereits vorher abgetragen und ist in den Schichten nicht enthalten; die Grabenfüllung besteht aus den Schichten 1-3 mit Schicht 3 als reduzierte, unterste Grabenschicht; Schichten 4 und 5 liegen nicht unterhalb von Schicht 3, sondern neben dieser und

beinhalten das durch das latènezeitliche Ausheben des Grabens unbeeinflusste, ursprüngliche Bodenmaterial.

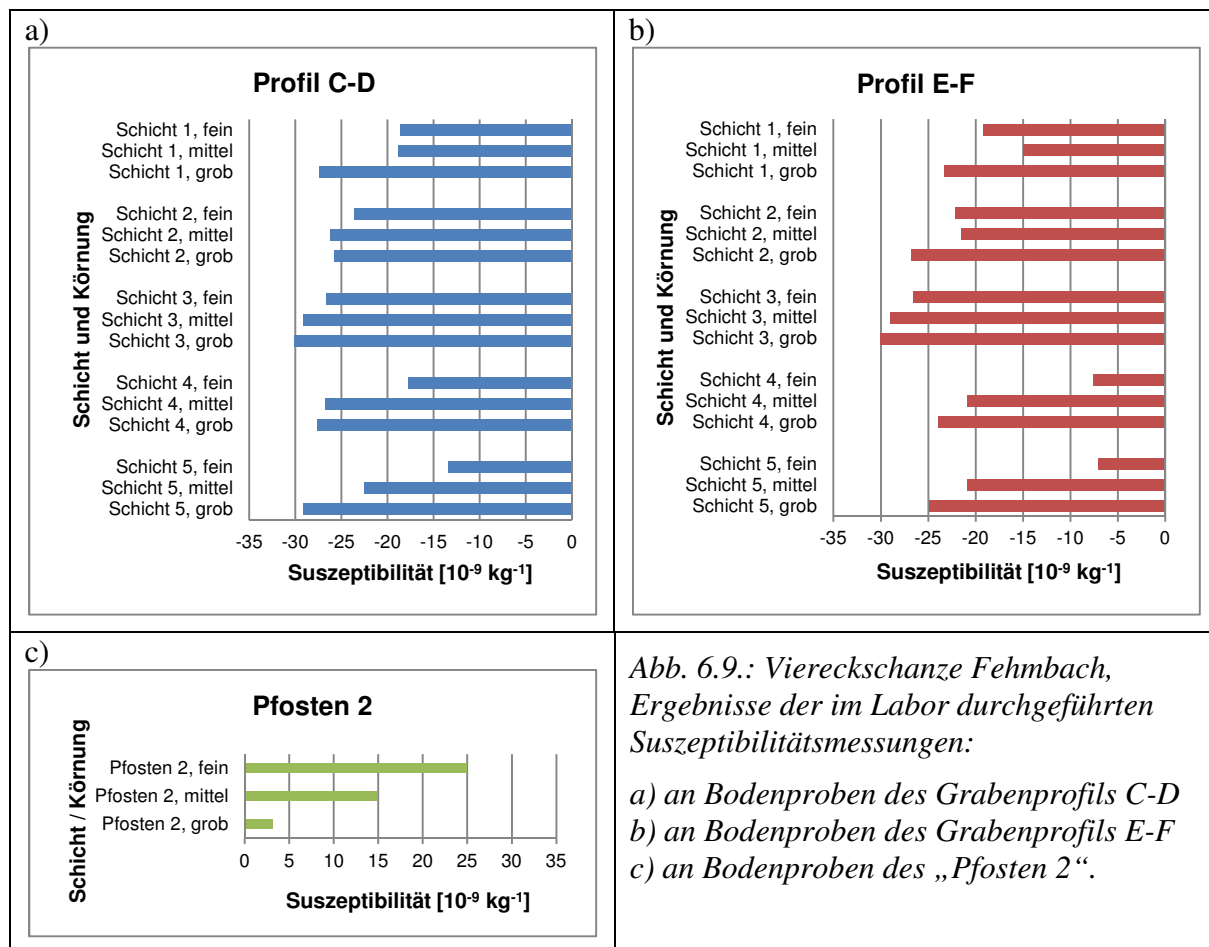


Abb. 6.9.: Viereckschanze Fehmbach, Ergebnisse der im Labor durchgeführten Suszeptibilitätsmessungen:

a) an Bodenproben des Grabenprofils C-D
 b) an Bodenproben des Grabenprofils E-F
 c) an Bodenproben des „Pfosten 2“.

Beobachtungen:

- Die Suszeptibilitätswerte der Grabenverfüllungen der Profile C-D und E-F liegen überraschenderweise ohne Ausnahme im deutlich negativen Bereich.
- Die Werte der Probe „Pfosten 2“ sind dagegen wie erwartet deutlich positiv (vgl. hierzu auch die Untersuchungen von FABBINDER [1994] an archäologischem Pfostenmaterial). Daher kann ein systematischer Messfehler bei den Suszeptibilitätsmessungen ausgeschlossen werden.
- Die Grobfraction der einzelnen Beprobungsschichten zeigt stets eine niedrigere Suszeptibilität als die Feinfraction.
- Allgemein steigt die Suszeptibilität der Grabenprofile von Schicht 1 zu 3 hin, also mit zunehmender Tiefe, leicht an und fällt bei 4 und 5 wieder stark ab. Dies gilt vor allem für die Feinfraction.
- Schicht 3, an der die niedrigsten Werte der Suszeptibilität gemessen wurden, entspricht dem untersten, grau-blau reduzierten Grabenbereich. Die darüber liegenden Verfüllungsschichten 2 (Kies- und Lehmmaterial) und 1 (schluffig-toniges Feinsediment) weisen höhere Werte auf. Ebenso verhält es sich bei den Schichten 4 und 5, welche anstehenden Kies enthalten und unterhalb bzw. außerhalb des ehemaligen Grabens der Viereckschanze liegen.

- Bei der Erklärung der negativen Suszeptibilitätswerte im Graben darf nicht außer Acht gelassen werden, dass keine der Beprobungsschichten den aktuellen obersten Bodenbildungshorizont enthält, in dem sicher positive Werte zu erwarten wären. Der Pflughorizont und auch eine dem Kies aufliegende Lehmschicht war im Zuge der Grabung vor der Beprobung bereits entfernt worden, siehe Kapitel 6.1. und Abbildung 6.2. Vgl. hierzu auch die Suszeptibilitäts-Messungen im Kapitel 5 (Papferding), in welchen die Messwerte in einer Tiefe von etwa 35 cm mit dem unteren Ende des Pflughorizonts abrupt um etwa 30% abnehmen.

Die Beobachtungen führen zu den Schlussfolgerungen:

- Die Grobfraction besteht hauptsächlich aus Quarziten mit negativer Suszeptibilität, die Feinfraction aus einer Mischung aus seit dem Bau der Viereckschanze neu gebildetem Bodenmaterial und den natürlich zermahlenen Anteilen des Gesteinsinhalts. Je feiner das Probenmaterial ist, desto höher ist der Anteil an Bodenmaterial und desto höher („weniger negativ“) ist auch die Suszeptibilität.
- Da die Beprobungsschichten mehrere Dezimeter unterhalb der Geländeoberkante und somit auch unterhalb des biologisch aktiven Bodenbereichs liegen, sind hier rezente Neubildungen ferrimagnetischer Minerale eher unwahrscheinlich.
- Der ehemals hier gebildete Magnetit wurde vor allem in Schicht 3 (unterer Grabenbereich) durch den reduzierenden Einfluss des gestauten Bodenwassers vermutlich bereits aufgelöst, das Eisen wurde in der nun vorliegenden, mobilen Form als Fe^{2+} abtransportiert.

Zur weiteren Untersuchung dieser Hypothesen wurden weitere gesteinsmagnetische Untersuchungen am vorliegenden Probenmaterial durchgeführt.

6.4.3. Messungen an der VFTB (Variable Field Translation Balance)

6.4.3.1. Probenmaterial und Vorgehensweise

An den beiden VFTBs am Institut für Geophysik der LMU München wurden Messungen der IRM, der Hysteresekurve und der Koerzitivkraft sowie thermomagnetische Messungen durchgeführt. Für die Messungen wurden, ebenso wie bei den Messungen der Suszeptibilität, Proben des Profils C-D (Schicht 1-5), des Profils E-F (Schicht 1-5) und Material der Pfostenstellung „Pfosten 2“ untersucht. Wegen der geringen Größe der Probenhalter mit einem Durchmesser von wenigen Millimetern konnte jeweils nur die Feinfraction der Bodenproben verwendet werden. Typische Probengewichte lagen zwischen 220 und 500 Milligramm.

Die Messungen der IRM, der Hysteresekurve und der Koerzitivkraft wurden unmittelbar hintereinander an derselben Probe durchgeführt. Für die anschließende Messung der thermomagnetischen Kurven wurde jeweils frisches Probenmaterial verwendet.

Einzelheiten zur Funktionsweise des Geräts und Messparameter sind in Anhang 1 aufgeführt. Die Messkurven finden sich in Anhang 2, die kompletten Messdaten auf der beiliegenden CD.

6.4.3.2. IRM und Backfieldmessungen

Abb. 6.10.a zeigt eine Übersicht der IRM-Werte der einzelnen Schichten der Profile C-D und E-F sowie der Pfostenstellung „Pfosten 2“. Bei der an einem der VFTB-Geräte am Institut für Geophysik in München maximal erreichbaren Feldstärke von $310 \cdot 10^3$ A/m (dies entspricht etwa 389 mT, Millitesla) konnte bei den Proben keine Sättigung (SIRM) erreicht werden, was auf starke paramagnetische Anteile hinweist. Einzelne Proben wurden an dem anderen Gerät gemessen, bei der die Spitzenwerte der Feldstärke bis zu etwa $662 \cdot 10^3$ A/m erzielt wurden, aber auch hier erfolgte keine vollständige Sättigung der Proben. Zur Vergleichbarkeit wurden hier immer die IRM-Werte bei $310 \cdot 10^3$ A/m (bzw. $302 \cdot 10^3$ A/m) angegeben.

Im unmittelbaren Anschluss an die Hysteresemessungen (siehe Abschnitt 6.4.2.3.) wurden an den so aufmagnetisierten Proben Backfieldmessungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 6.10.b dargestellt.

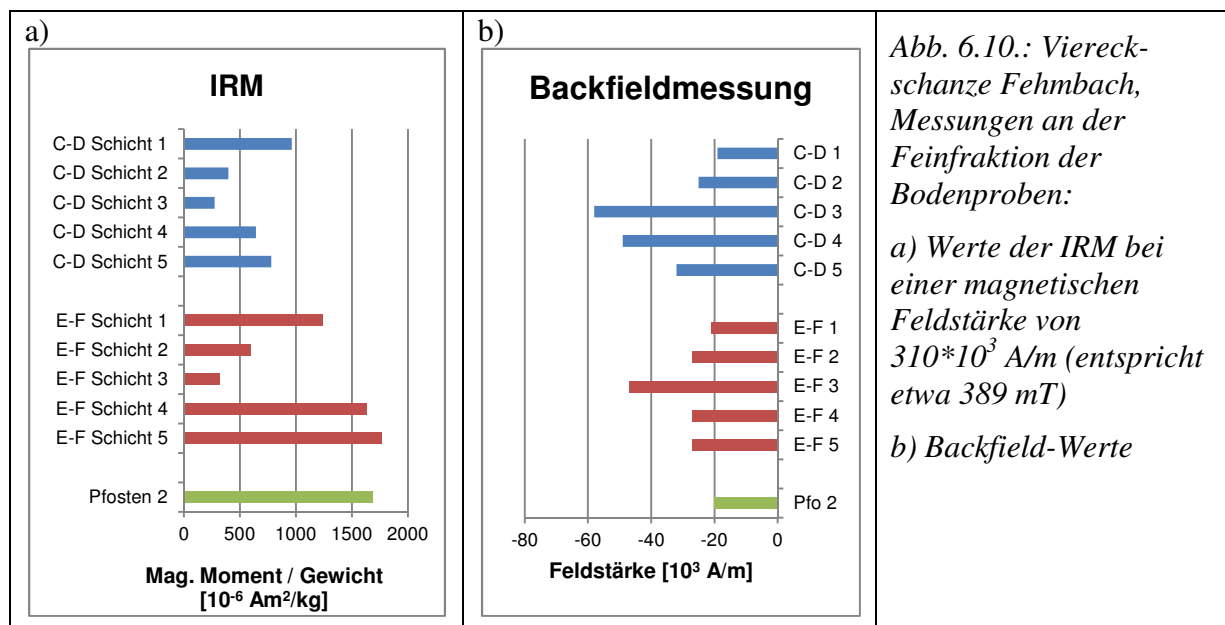


Abb. 6.10.: Viereckschanze Fehmbach, Messungen an der Feinfraktion der Bodenproben:

a) Werte der IRM bei einer magnetischen Feldstärke von $310 \cdot 10^3$ A/m (entspricht etwa 389 mT)

b) Backfield-Werte

Ergebnisse:

- Die IRM zeigt den relativen Vergleich des Gesamtgehalts an ferro(i)magnetischem Material in den einzelnen Schichten. Auch hier liegen wie bei der Suszeptibilität die niedrigsten Werte jeweils in den Schichten 3 und 2, d. h. im jeweils unteren bzw. mittleren Grabenbereich. Also sind hier weitaus weniger ferro(i)magnetische Minerale vorhanden als im oberen Grabenteil.
- Die höchsten Werte der IRM finden sich vor allem im ungestörten Untergrund neben dem Graben (E-F 4 und E-F 5), sie erreichen dieselbe Größenordnung wie die IRM der ehemaligen hölzernen Pfostenstellung.
- Eine hohe IRM korreliert mit niedrigen Backfieldwerten. Hier sind also eher magnetisch „weiche“ Materialien wie Magnetit oder Maghemit zu vermuten als hochkoerzitive Phasen wie Hämatit oder Goethit, wobei sich letztere aufgrund der Überlagerung verschiedener Mineralphasen in Böden allein aufgrund der Backfieldwerte nicht unbedingt ausschließen lassen.

6.4.3.3. Hysterese- und thermomagnetische Messungen

Nach der Messung der IRM, Hysterese- und Backfieldkurven wurde für die Erstellung der thermomagnetischen Kurven jeweils frisches Probenmaterial verwendet. Dieses wurde unmittelbar vor der Messung mit einem starken magnetischen Feld (etwa $3 \cdot 10^5$ A/m) aufmagnetisiert. Während der Messung selbst war nur ein kleines Feld von etwa $25 \cdot 10^3$ A/m angelegt, um den Einfluss des paramagnetischen Anteils der Proben möglichst gering zu halten.

Abbildung 6.11. zeigt typische Hysterese- und thermomagnetische Kurven für

- a) den Grabenbereich (Profile C-D und E-F, jeweils Schichten Nr. 1-3)
- b) den Bereich außerhalb des Grabens (Profile C-D und E-F, jeweils Schichten Nr. 4-5)
- c) die Pfostenstellung „Pfosten 2“

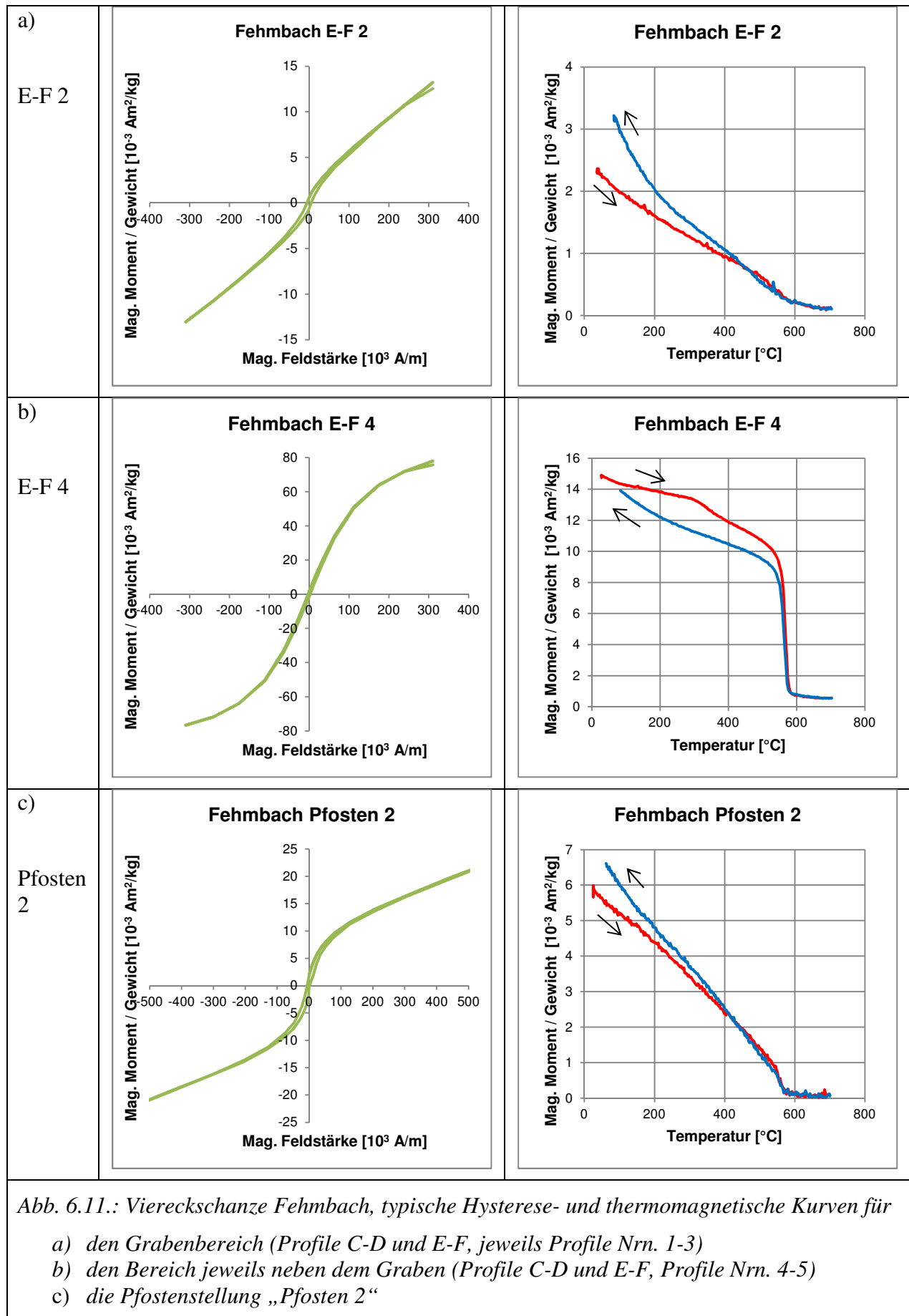
Die Zusammenstellung aller Kurven findet sich in Anhang 2 sowie in der Excel-Datei „Fehmbach Labor Auswertungen“ auf der beiliegenden CD.

Ergebnisse:

- Im Grabenbereich der Profile C-D und E-F überwiegen paramagnetische Minerale. Ein schwach erkennbarer Abfall der Aufheizkurve bei 580°C deutet auf geringe Mengen von Magnetit hin.
- Im durch die Viereckschanze ungestörten Bodenbereich neben dem Graben zeigt vor allem die thermische Behandlung eindeutig die Dominanz von Magnetit. In den Proben C-D 4, E-F 4 und E-F 5 ist zusätzlich ein leichter Abfall bei etwa 330°C erkennbar. Dieser könnte auf Pyrrhotit mit einer Curietemperatur von 320°C oder auf Greigit ($T_C = 330^\circ\text{C}$) hindeuten. Letzteren würde man allerdings eher im anoxischen, grau-grün gefärbten Bereich des unteren Grabenteils (Schicht 3) vermuten. Da wir uns hier jedoch im rostbraun gefärbten, gut durchlüfteten Gebiet befinden, ist die Oxidation des Magnetit zu Maghemit in einem gewissen Maß durchaus zu erwarten. Maghemit wandelt sich bei höheren Temperaturen zu schwach magnetischem Hämatit um (EVANS & HELLER [1994]) und kann zu dem beobachteten Knick im Kurvenverlauf führen.
- Die Messkurven der Pfostenstellung zeigen ein Gemisch aus Magnetit und paramagnetischen Mineralen.

Im direkten Vergleich zu den Ergebnissen von Papferding (Kapitel 5) lässt sich feststellen:

- In den thermischen Aufheizkurven von Fehmbach fehlen völlig die Peaks bei 280°C und $400\text{-}450^\circ\text{C}$, welche bei den Papferding-Daten eindeutig auf chemische Umwandlungen hinweisen. Zudem deckt sich beim Probenmaterial von Fehmbach die Abkühlkurve recht gut mit der Aufheizkurve, wodurch ebenfalls belegt ist, dass Ausgangsmaterial und Endprodukt sich chemisch kaum unterscheiden.
- Der ursprünglich im Boden vorhandene Magnetit wurde im Graben der Viereckschanze durch reduktive Auflösung vermindert, vor allem im unteren Grabenbereich, der Phasen von Stauwasser ausgesetzt gewesen sein dürfte. Allerdings fehlt hier der Lepidokrokit, welcher in Papferding anhand der in der thermischen Messung erkannten Umwandlung in Maghemit identifiziert werden konnte. Offensichtlich haben sich hier andere Eisenoxide, vermutlich Siderit, gebildet: „Bei eisen- und carbonatreichem Grundwasser zeigen Reduktionshorizonte Ausfällungen von z. T. hartem, hellgrauem bis gelblichweißem Eisencarbonat (Siderit).“ (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN [2005], S. 113.)



6.4.4. Interpretation der Laboruntersuchungen

Bei dem ursprünglichen Untergrund der Viereckschanze handelt es sich vermutlich um einen wegen des dominierenden Kiesanteils gut durchlüfteten Boden mit guter Entwässerung. Das bei Niederschlägen eindringende Wasser konnte und kann durch den Abfall des Geländes zur nahen Niederterrasse der Donau ungehindert abfließen und dürfte durch den ständigen Austausch und seine Bewegung auch sauerstoffreich gewesen sein. Der Aushub des Grabens der Viereckschanze hatte vermutlich eine zusätzliche entwässernde, da Wasser sammelnde Wirkung auf die Umgebung.

Die neben dem Graben liegenden Bereiche bleiben relativ trocken. Daher wurde der durch Bodenbildung entstandene Magnetit nicht durch Stauwassereinfluss aufgelöst, er ist in den durch den Aushub des Grabens unberührten Schichten noch vorhanden und wurde allenfalls in gewissem Maß zu Maghemit oxidiert.

Im Graben selbst allerdings bildeten sich vor allem im unteren Bereich in mäßigem Umfang tonige Bodenschichten aus, die zum lokalen Wasserstau innerhalb des Grabens führten; vor allem im Bereich der Grabenspitze deutet die grau-grüne Färbung des Bodens auf ein sauerstoffarmes Milieu hin. Da nun das Wasser nicht mehr ungehindert abfließen konnte, ist im Graben eine zeitweilige Wasserstauung anzunehmen. Diese führte zur teilweisen Auflösung der im Untergrund vorhandenen ferrimagnetischen Minerale und, in der Konsequenz für Magnetometerprospektionen, zum Fehlen der erwarteten positiven Anomalie.

Hier in Fehmbach führte allerdings ein weiterer Faktor dazu, dass die Grabenanomalie sich in ungewöhnlicher Form herausbildete. Es handelt sich um den Eintrag von Kies von der Wallseite her, der hier lokal einen hohen Anteil an diamagnetischem Quarzgestein hat und damit in manchen Bereichen, vor allem auf der dem Wall zugewandten Grabenseite, sogar zu einer lokalen negativen Anomalie im Vergleich zur unmittelbaren Umgebung führen konnte.

6.5. Vergleich mit der Viereckschanze von Aubing / Moosswaige

Die Viereckschanze von Aubing / Moosswaige (Anhang 3, Anlage 8; Literatur siehe dort) wurde im Zuge der vorliegenden Arbeit im April 2009 prospektiert. Seine Lage auf der Münchner Schotterebene, mit Ackerpararendzina und Braunerde über carbonatreichen Schottern, könnte analog zu Fehmbach auf einen gut durchlüfteten und wasserdurchlässigen Boden hinweisen. Auf den ersten Blick sollte man in Aubing also ebenfalls mit der Ausbildung gewisser wechselnder, positiver oder negativer Anomalien rechnen können. Bei der Auswertung der Prospektion waren jedoch keinerlei Anomalien mehr feststellbar, der Boden wirkte magnetisch gesehen, abgesehen von den üblichen Schwankungen, völlig unbeeinflusst durch menschliche Gestaltung oder Umformung.

Bei näherer Betrachtung des lokalen Untergrundes wird allerdings klar, dass hier in Aubing nicht die Möglichkeit des ungestörten Wasserabflusses wie bei der donau nahen Anlage von Fehmbach gegeben ist. Im Gegenteil, das Wasser hatte die Landschaft um Aubing zu einem Mooregebiet umgestaltet.

Aus dem Prospekt „Das Aubinger Moos“ (hrsg. vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, 2005): „Das Aubinger Moos ist ein wichtiger Teil des Dachauer Moores. Ein mächtiger Grundwasserstrom schuf über Tausende von Jahren dieses gewaltige Quellmoor. Sein hoher Grundwasserspiegel ließ 123 km weglasse und undurchdringliche Moor- und Sumpflandschaft entstehen, die heute von Germering bis Freising

reichen würde.“ Auch der Name „Moosswaige“ weist auf den dominierenden Wassereinfluss hin.

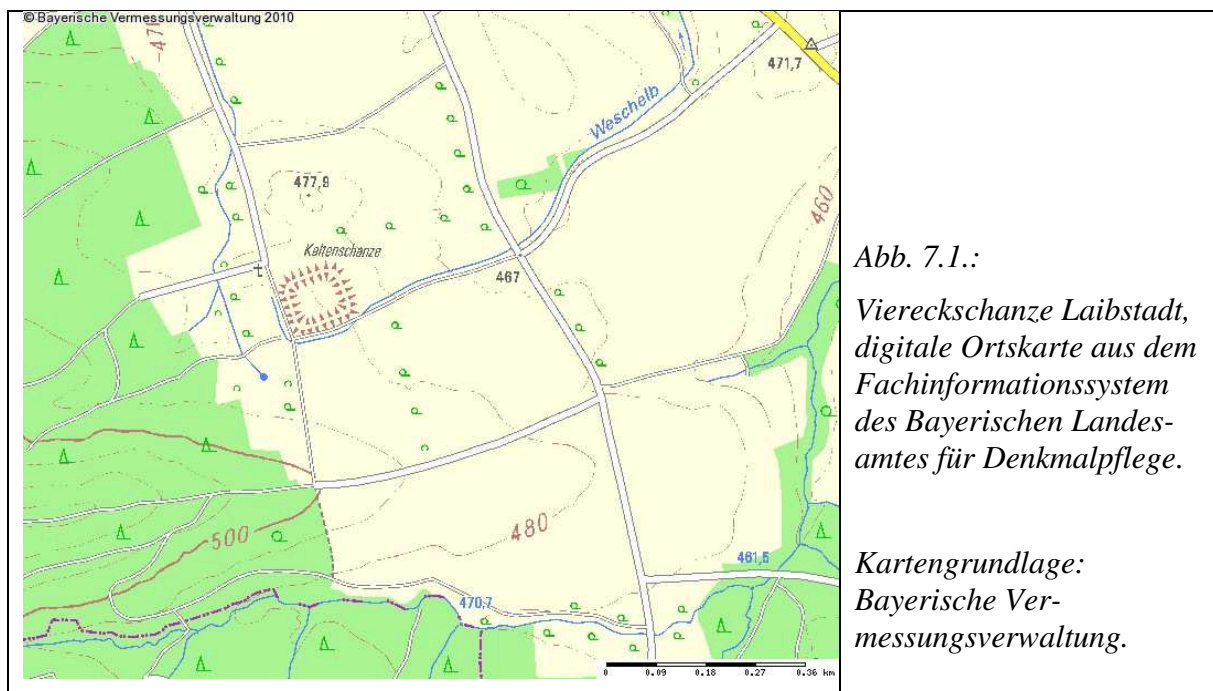
Erst in den letzten Jahrhunderten wurde dieses ehemalige Moorgebiet trocken gelegt und für die Landwirtschaft nutzbar gemacht. Durch den Vergleich mit den Messungen von Fehmbach und Papferding ist nun davon auszugehen, dass das ständig vorhandene Wasser hier vorwiegend in gestauter, sauerstoffarmer Form vorhanden war und ferrimagnetische Minerale seit der Aufgabe der Viereckschanze komplett aufgelöst wurden. Zudem liegt in der bodenkundlichen Beschreibung „mit Flussmergel- oder Hochflutlehmüberdeckung“ der Hinweis auf regelmäßige Überschwemmungsereignisse. Daher können auch verstärkte Erosionsprozesse der wassergesättigten und damit instabilen oberen Bodenschichten eine zerstörerische Wirkung auf die Reste der Anlage gehabt haben, wodurch auch die im Boden enthaltenen Eisenminerale abtransportiert oder verteilt worden sein können.

Kapitel 7. Gelände- und Labormessungen – Laibstadt

7.1. Geologie, Boden und Gelände

Die Viereckschanze von Laibstadt liegt in Mittelfranken im Landkreis Roth, am Nordfuß des Fränkischen Jura. Geologisch finden wir Tongestein, das von einem Boden aus lehmigen Doggertonen, Braunerden und Pseudogleyen überlagert ist. Der Boden ist durch den hohen Tongehalt besonders in Mulden stark Wasser stauend, wodurch der Innenraum zu starker Bodenfeuchte neigt.

Die Anlage befindet sich auf einem kleinen Plateau eines leicht nach Norden und Osten abfallenden Hanges. Im großteils verfüllten Graben zeigt sich heute noch an der Süd- und Westseite eine deutliche Vernässung bzw. ein zeitweise Wasser führender kleiner Bachlauf, der laut digitaler Ortskarte direkt im Graben entspringt. Eine Entwässerung des Grabens ist nach Osten über den heutigen Weschelbach anzunehmen. Ein weiterer Wasserzulauf von Westen her ist möglich, aber nicht belegt. Etwa 500 Meter südlich der Viereckschanze ist ein verzweigtes System von Bachläufen erkennbar, das aber wegen des dazwischen liegenden Geländerrückens nicht mit dem Graben in Verbindung steht und somit nicht zur Wasserezufuhr beigetragen haben kann (Abb. 7.1.).



In der Uraufnahme von 1825 ist die Viereckschanze als Grünland eingetragen und wird seitdem vermutlich durchgehend bis heute als solches genutzt; zumindest für die letzten Jahrzehnte konnte dies durch mündliche Mitteilung der Pächterfamilie bestätigt werden. Ackerbau ist nur in den Bereichen nördlich und westlich der Schanze bekannt. Das Fehlen der landwirtschaftlichen Bearbeitung des Innenraums schützte die archäologischen Befunde im Untergrund, wobei während der Heuernte eine gewisse Bodenverdichtung durch schwere Gerätschaften erfolgt sein kann.

7.2. Archäologie

Archäologisch gesehen gehört die Viereckschanze zu den gut obertäglich erhaltenen Exemplaren dieser Denkmälergattung; sie ist im Atlas der spätkeltischen Viereckschanzen Bayerns (SCHWARZ [1959]; SCHWARZ [2007]) als Blatt 99 aufgeführt. Der Wall ist zwar auf allen vier Seiten stark verflacht, aber dennoch mit einer Höhe von bis zu 1,5 Metern erhalten mit einer deutlich erkennbaren Zugangsöffnung in der Mitte des Ostwalles. Die Überhöhung der Wallecken zeigt sich hier ebenso wie der im Vergleich zur Umgebung höher gelegene Innenraum der Anlage (SCHWARZ [1960], REICHENBERGER [2005]). Mit ihrer nahezu quadratischen Form, Seitenlängen (entlang der Wallmitten) von 87 bis 99 Metern und Eckwinkeln zwischen 88 und 93 Grad kommt sie dem Idealbild einer spätkeltischen Viereckschanze sehr nahe (Abb. 7.2.).

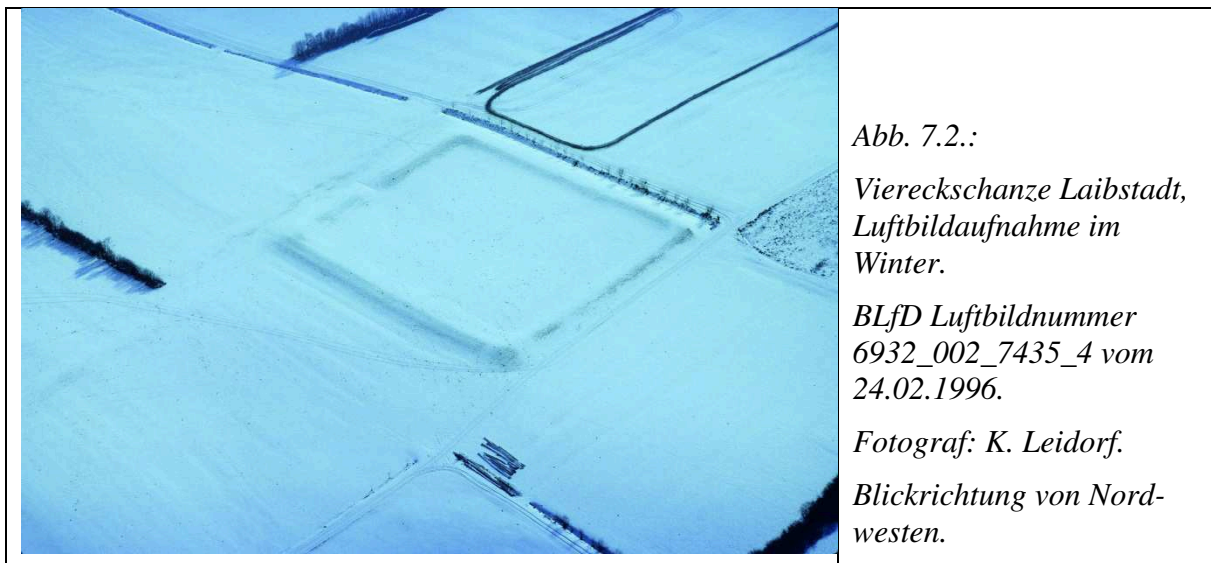


Abb. 7.2.:

*Viereckschanze Laibstadt,
Luftbildaufnahme im
Winter.*

*BLfD Luftbildnummer
6932_002_7435_4 vom
24.02.1996.*

Fotograf: K. Leidorf.

*Blickrichtung von Nord-
westen.*

Im Umkreis von einigen hundert Metern um die Viereckschanze finden sich verschiedene neolithische und vorgeschichtliche Siedlungsspuren. Im Bereich der Schanze selbst sind keine Lesefunde bekannt, Grabungen wurden bislang nicht durchgeführt. Westlich außerhalb der Anlage zeigen sich Spuren von Hochackerbeeten, die wegen ihres Eingreifens in die Außenböschung des westlichen Grabens jüngeren Datum sein müssen als dieser. Ferner sind aus dem 15. Jahrhundert kleine Bergwerke bekannt, in denen vermutlich Eisenerze oder Ölschiefer abgebaut wurden. Eine Stollenlänge von 84 Metern ist durch eine Grabung der Höhlen- und Karstgruppe Greding sicher belegt, eine Länge bis 1,5 Kilometern wird bislang nur vermutet (FLEISCHMANN ET AL. [1987]). Auch die im Folgenden beschriebene Magnetometerprospektion lieferte keine Hinweise darauf.

7.3. Magnetometerprospektion

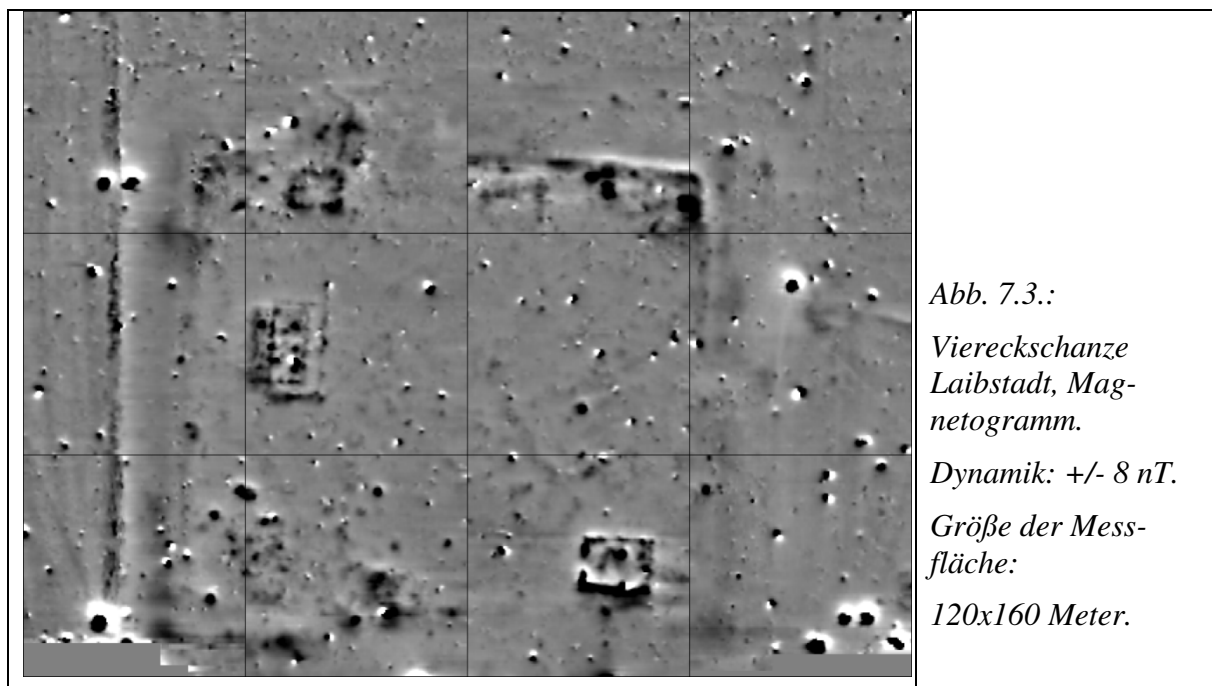
Bei dieser Prospektion sind der Graben (Abb. 7.4., K) und der innen anschließende Wallbereich (Abb. 7.4., L) nur schwach erkennbar und deuten sich vor allem durch eine magnetisch relativ ruhige und störungsfreie Zone an. Dagegen zeigen die Pfostenspuren der ehemaligen hölzernen Innenbebauung starke positive magnetische Signale mit Intensitäten bis zu etwa ± 30 nT, an einzelnen Stellen sogar bis zu ± 60 nT. Daher kann man hier von einem

Abbrand der Bauten ausgehen, siehe Kapitel 2.3.3.1 (Le Borgne-Effekt). Ähnliche Werte zeigten sich z. B. auch bei der Prospektion der Viereckschanze von Weiltingen (BECKER [2001]).

Das Magnetogramm (Abb. 7.3.) zeigt deutlich die Spuren mehrerer Gebäude. Am auffälligsten ist das dem Eingang gegenüber liegende zweiphasige Hauptgebäude (Abb. 7.4., A und B). Nach dem Abbrand des ersten Hauptgebäudes muss nahezu an gleicher Stelle ein neuer Bau errichtet worden sein, dessen Wände wie auch schon beim ersten Mal parallel zum Wall verliefen, wobei das neue Gebäude um etwa vier Meter seitlich versetzt wurde.

FRIES-KNOBLACH [2007] stellt den seitlichen Versatz von eisenzeitlichen hölzernen Nachfolgebauten in Zusammenhang mit Richtlinien zur Errichtung von Telegraphen- und Strommasten des 19. und 20. Jahrhunderts. In diesen wird gefordert, dass beim Erneuern der hölzernen Masten ein Abstand von ein bis zwei Metern zum ursprünglichen Aufstellort einzuhalten sei, da nach dem Verfaulen alter Masten auch der Boden mit Fäulniseregern durchsetzt sei, der die Lebensdauer am selben Ort neu eingesetzter Pfosten deutlich verkürzen würde. Es ist gut denkbar, dass auch bei der Neuerrichtung von Viereckschanzengebäuden bereits auf solcherlei Gesichtspunkte geachtet wurde.

Eine Zweiphasigkeit eines inneren Baues zeigte sich auch an anderen Anlagen wie z. B. bei der Grabung an der Viereckschanze von Holzhausen (SCHWARZ [1975]), bei der das westliche Eckgebäude ebenfalls unter Beibehaltung der Richtung des Wandverlaufs um wenige Meter zum Innenraum hin verlagert worden war. Auch die Magnetometerprospektion an der Anlage von Itzling (KRAUSE ET AL. [2012]) lässt die Zweiphasigkeit eines zentralen Gebäudes erkennen.



Da die magnetischen Anomalien der Pfostenspuren in Laibstadt bei dem westlicher liegenden Gebäude (Abb. 7.4., A) weniger klar definiert sind als beim östlichen (Abb. 7.4., B) und von diesen überschritten werden, kann man darauf schließen, dass letztere oberflächennäher liegen und somit das zum Innenraum hin gerückte Gebäude B das jüngere ist.

Die ältere Bauphase A weist eine Gebäudegröße von etwa 13 x 10 Metern auf, die jüngere Phase B etwa 18 x 10 Meter. Die Zuordnung der Innenpfosten zu den einzelnen Bauten lässt sich aus dem Magnetogramm nicht eindeutig klären.

Weitere große Gebäude finden sich in der Südostecke (Abb. 7.4., C) und 16 Meter östlich der Nordwestecke (Abb. 7.4., D) mit Größen von 12,5 x 10 Meter bzw. 10 x 8 Meter.

In der Nordostecke hat sich offensichtlich der magnetische Brandschutt am Wallfuß gesammelt oder wurde dorthin verschoben. Unmittelbar davor liegen mehrere starke kompakte und vermutlich tiefere Strukturen (Abb. 7.4., E). Hierbei könnte es sich um Grubenhäuser oder auch um verbrannte Holzverschalungen von Brunnen oder Schächten handeln.

Dazwischen sind kleinere Grubenstrukturen erkennbar, ebenso wie in der Nordwest- und der Südwestecke sowie vor der Mitte des Südwalls (Abb. 7.4., F). Die innerhalb des Nordwalls liegende Struktur G im Plan lässt sich nicht leicht deuten, eventuell zeigt das Messbild ein nur teilweise verbranntes Gebäude oder eine Reihe kleinerer Gruben. Einige tiefere Strukturen, mögliche Brunnen oder sonstige Schächte (Abb. 7.4. H), ergänzen das Bild.

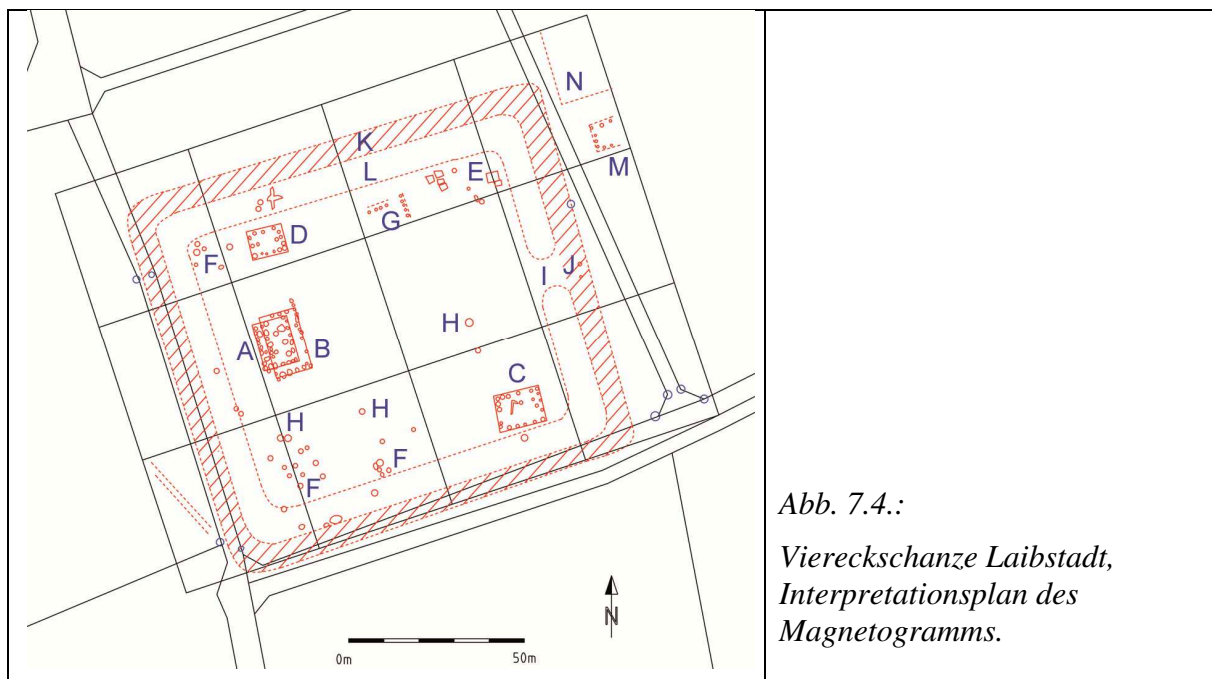


Abb. 7.4.:
Viereckschanze Laibstadt,
Interpretationsplan des
Magnetogramms.

Obwohl die Lage der Toröffnung (Abb. 7.4., I) auch heute noch im Wall vorhanden ist, lässt sich im Magnetogramm kein Torgebäude ausmachen. Nur andeutungsweise sind mögliche Pfosten einer ehemaligen Holzbrücke im Grabenbereich zu vermuten (Abb. 7.4., J). Die Struktur M außerhalb der Viereckschanze könnte auf ein Gebäude hindeuten. Die Pfostenreihen N dagegen stellten sich bei der Geländearbeit als Spuren eines rezenten, nur zeitweise aufgebauten mobilen Schafzauns heraus.

Beim Hauptgebäude ist durch die Zweiphasigkeit ein zeitliches Aufeinanderfolgen der Bebauung belegt. Auch die andern Gebäude und Strukturen werden vermutlich nicht alle gleichzeitig bestanden haben, sondern sich zeitlich über die übliche Nutzungsdauer bei Viereckschanzen von etwa 150 Jahren verteilen.

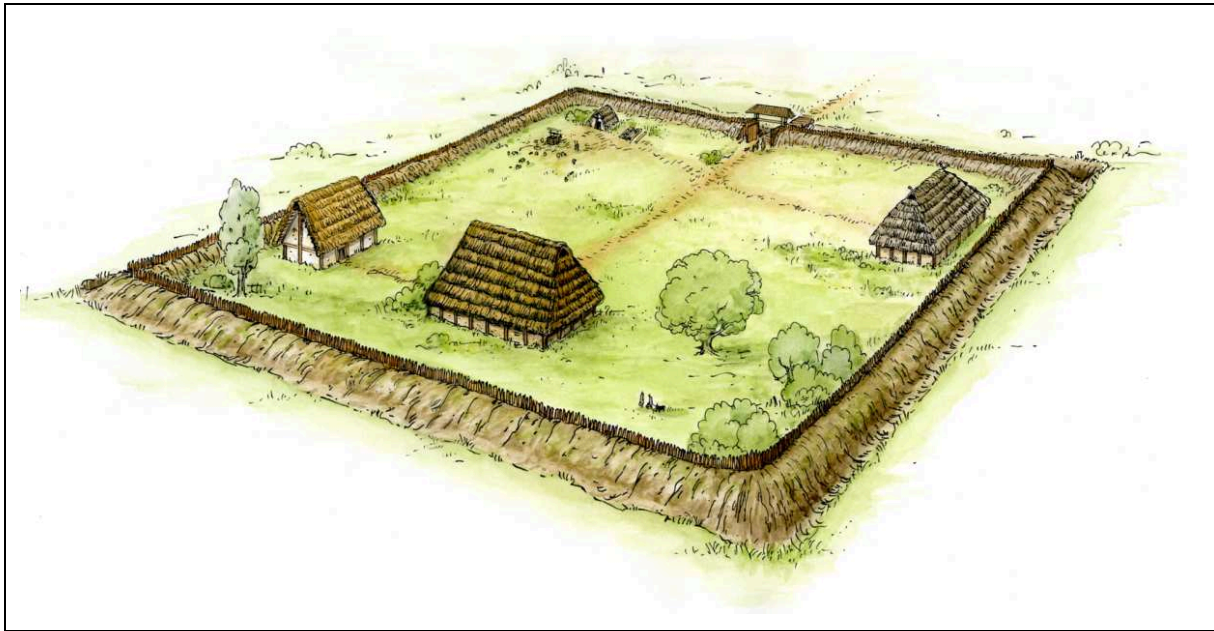


Abb. 7.5.: Viereckschanze Laibstadt, Rekonstruktionsvorschlag basierend auf den Ergebnissen der Magnetometerprospektion. Blick von Südwesten. Grafik: Jutta Sailer.

7.4. Laboruntersuchungen an Bodenproben

7.4.1. Beprobung

Wegen der ungewöhnlichen Diskrepanz von guter magnetometrischer Nachweisbarkeit der Innenbebauung bei gleichzeitigem Fehlen magnetischer Signaturen des Grabenbereichs wurde diese Viereckschanze zur näheren Untersuchung mittels Beprobung und gesteinsmagnetischer Messungen ausgewählt.



*Abb. 7.6.:
Viereckschanze Laibstadt,
Entnahme von Boden-
proben.*

Die Probennahme (siehe Abb. 7.6. mit 7.8.) fand im November 2009 statt. Mit einem Bohrer der Firma Atlas Copco wurden in der Nordwestecke der Viereckschanze vier Bohrungen in einer linearen Flucht durchgeführt, die sich wie folgt aufteilen:

Probe Nr.	Beschreibung
1	Außerhalb der Viereckschanze, im unveränderten Boden
2	Graben
3	Heutige Wallkrone
5	Innenraum, in positiver magnetischer Anomalie. 1 Meter westliche Abweichung von der linearen Flucht wegen Lage der magnetischen Anomalie.

Tab. 7.1.: Viereckschanze Laibstadt, Beschreibung der Beprobungspunkte.

Anmerkung: Die ursprünglich aus dem Innenraum entnommene Probe 4 wurde nicht bearbeitet, da sie genau auf der Grenze zu der positiven Anomalie liegt und daher keine klaren Ergebnisse zu erwarten waren. Sie wurde daher durch Probe 5 ersetzt, die klar innerhalb der positiven magnetischen Anomalie liegt.

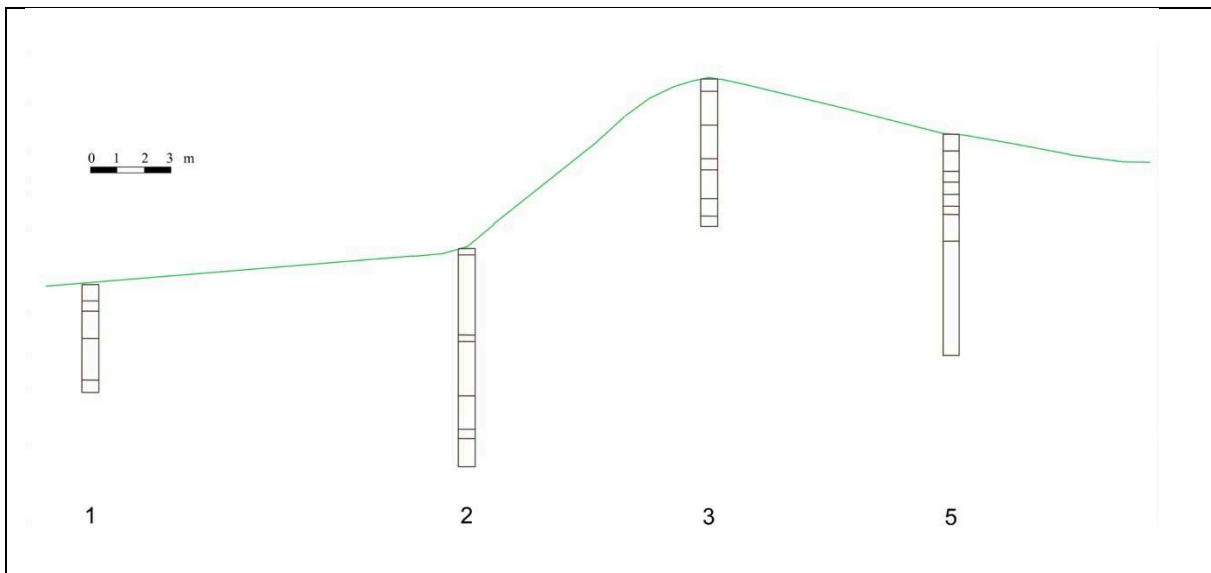
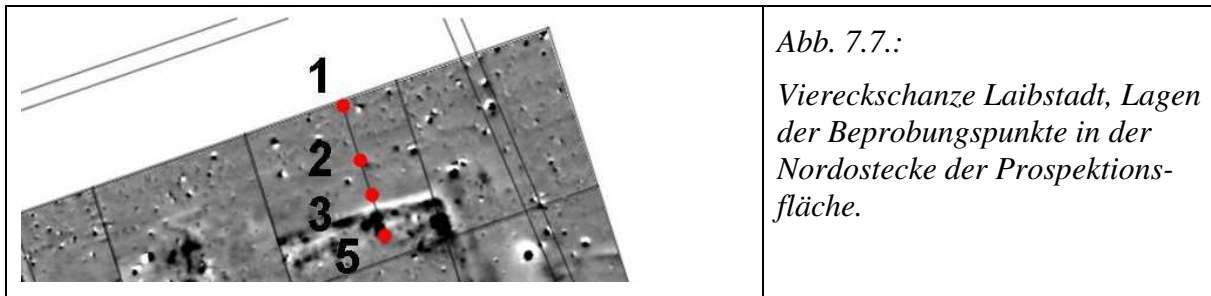


Abb. 7.8.: Viereckschanze Laibstadt, Lagen und Höhen der Beprobungspunkte relativ zueinander. Der Abstand der äußersten Punkte 1 und 5 voneinander beträgt 32 Meter, die Höhenverhältnisse sind dem gegenüber fünffach überhöht. Die eingezeichneten Schichtgrenzen entsprechen den Profilbeschreibungen in Tab. 7.2. – 7.5.

Nach der bodenkundlichen Profilansprache der Bohrkerns wurden die einzelnen Schichten getrennt aus der Bohrvorrichtung entnommen und verpackt. Im Labor wurde die jeweils äußere Probenschicht mit Hilfe eines Plastikmessers entfernt, um mögliche metallische Anhaftungen des Bohrers zu entfernen. Die Bodenproben wurden daraufhin grob zerkleinert, mehrere Tage an der Luft vollständig durchgetrocknet und vor den gesteinsmagnetischen Messungen im unglasierten Porzellanmörser zerstoßen.



Abb. 7.9.: Viereckschanze Laibstadt, Bohrkern aus Profil 2.

7.4.2. Beschreibung der Bohrprofilschichten

Anhand der vier Bohrprofile ließen sich folgende Bodenschichten identifizieren, siehe Tabellen 7.2. mit 7.5.:

Tiefe	Kennzeichnung	Farbe	Gefüge	Beschreibung
0-12 cm	Ah (humoser Oberboden)	Dunkelbraun	krümelig	Durchwurzelt, mit Holzkohlefitterchen durchsetzt
12-20 cm	Ah/Bt, Übergangshorizont	Helleres Dunkelbraun	Krümelgefüge bis Subpolyedergefüge	Tonig, zunehmend lehmiger
20-40 cm	B, uT, pseudovergleyt	hellbraune und blaugrauen Tonflecken		Schwarze punktuelle Mangankonkretionen und orangefarbene Eisenausfällungen
40-71 cm	C, pseudovergleyt	fleckig, heller als bei 20-40 cm	Polyedergefüge	deutlicher Anteil an gelbbraunen Tonlinsen
71-80 cm	Ct, sehr tonhaltig, schluffiger Ton	zunehmend graublauer	Tonhäutchen	Mit Eisenkonkretionen

Tab. 7.2.: Viereckschanze Laibstadt, Beschreibung von Profil 1, ungestörter Außenraum.

Tiefe	Kennzeichnung	Farbe	Gefüge	Beschreibung
0-5 cm	jAh	Dunkelbraun	Schluffig	Durchwurzelt
5-65 cm	M (Kolluvium) / Sw-Sd	Fleckig, 70% blau, 30% rostbraun. Taubenblau bei 60 cm.	Krümelgefüge (verlagertes Wallmaterial)	Holzkohlefitterchen; viele kleine Eisenkonkretionen kleiner als 1 mm, einzelne 0,5 bis 1 cm große Eisenkonkretionen, Häufung innerhalb der Blaufleckung. Schluffiger Ton mit geringem Feinsandanteil.
65-70 cm	vermutlich Verzug wg. Bohrkernwechsel			
70-110 cm	M (Kolluvium) / Sw-Sd	komplett blau	schluffiger Ton	Mehr Eisenkonkretionen, diese werden größer (bis 1 cm), verteilen sich gleichmäßig im Kern. Keine Holzkohle.
110-135 cm	M / Sw-Sd (möglicherweise Go aus M-Material)	Schichtfarbe 40% grau / 60% braun in größeren Einzelflecken	krümelig	massiv angereichert mit größeren Eisen- und Mangankonkretionen (90% Fe, 10% Mn) vor allem bei 110-120 cm (Schichtgrenze?). Keine Holzkohle, schluffiger Ton
135-142 cm	(f)Gr ((fossiler) reduzierter Gley), reiner Ton.	90% taubenblau, 10 % feine Eisenschlieren	Polyedergefüge, Tonkutane.	Massiv stauend. Ab hier keine Holzkohlespuren, vermutlich anstehender Lehm, entstanden vermutlich aus Oberfläche der Grabenflanke unter ständigem Wasserstand im Graben.
142-163 cm	Ct, Ton	70% braun, 30% blau	Subpolyedergefüge	

Tab. 7.3.: Viereckschanze Laibstadt, Beschreibung von Profil 2, Grabenfüllung.

Tiefe	Kennzeichnung	Farbe	Gefüge	Beschreibung
0-10 cm	Ah	dunkelbraun	Krümelfüge	durchwurzelt
10-35 cm	jBv-Sw (anthropogen umgelagertes Natursubstrat), schluffiger Ton	Graubraun, leicht marmoriert, wenig grau und orange-rostbraun	schwach humos	schwach pseudovergleyt, kleine Eisen- und Mangankonkretionen
35-60 cm	jSw-Sd	Orange/rostbraun, leicht gefleckt	Subpolyedergefüge	Enthält Mangankonkretionen
60-68 cm	jBv in Resten?	graubraun, leicht blau-orange marmoriert	Subpolyedergefüge	an Unterkante große Eisenausfällungen, keine Holzkohle
68-90 cm	(f)Ah	dunkelbraun-hellblau-braun, stark fleckig	Krümelfüge (d. h. alte Oberfläche)	bis 75 cm: Kalkkonkretionen als Schichtwechselzeiger. Keine Holzkohle sichtbar
90-103 cm	(f)Ah-Bv	braun / grau gefleckt	Subpolyedergefüge	große Kalkkonkretionen auf 93-95 cm, braun-grau gefleckt, Ton-Humuskomplexe?
103-110 cm	Cv	90% braun, 10% grau-taubenblau gefleckt	Polyeder/Subpolyedergefüge	keine Konkretionen

Tab. 7.4.: Viereckschanze Laibstadt, Beschreibung von Profil 3, heutige Wallkrone.

Tiefe	Kennzeichnung	Farbe	Gefüge	Beschreibung
0-12 cm	Ah	dunkelbraun	Krümelfüge, durchwurzelt	keine Holzkohle sichtbar
12-28 cm	M (Kolluvium), schluffiger Ton	Dunkelbraun, haarnadelfeine rostbraune Eisenoxid-fleckung	Krümelfüge	Mangankonkretionen < 1 mm, vermutlich Holzkohle, Grobsand. Vermutlich scharfe Schichtgrenze (unter Bohrsteg) → Grube? Schichtuntergrenze: Ca. 10% massive wolkige Eisenausfällungen.
28-36 cm	fAh? Übergangshorizont	Marmoriert: rostbraun-hellgrau mit dunkelbraunen Tonflecken.	Subpolyeder-/Krümelfüge.	Vereinzelte Mangankonkretionen, Größe ca. 2mm. Schluffiger Ton. Ab 28 cm: Keine Holzkohle mehr. Wallkolluvium?
36-45 cm	fAh?	Rostbraun-hellgrau. Reduktionsmerkmale durch taubenblau-graue Marmorierung.	Subpolyedergefüge.	Eisenkonkretionen, vereinzelt, 3-5 mm. Schluffiger Ton. Wallkolluvium?
45-54 cm	fAh	Marmoriert, hellgrau-hellbraun.	Krümelfüge	Viele Mangankonkretionen 1-4 mm, auf der gesamten Schicht verteilt. Größere Mangankonkretionen markieren obere Schichtgrenze. Leichte wolkenartige Eisenausfällungen. Alter Unterboden.
54-60 cm		Grau-hellbraun marmoriert, 40% grau, 60% braun	Subpolyedergefüge	Einzelne Eisen- und Mangankonkretionen 2 mm. Zunehmend toniger. Leichte Reduktionsmerkmale.
60-80 cm		Zunehmende Bleichfleckung, 60% taubenblau-grau/ 40% braun.	Subpolyeder- bis Polyedergefüge.	Randliche Eisenausfällungen an blauer Schicht. Auch Eisenkonkretionen im gesamten Bereich. Kalkkonkretionen massiv bei 66-70 cm gepaart mit Eisenausfällungen.
80-165 cm	C, anstehender Lehm, Ton	marmoriert, 50 % hellgrau / 50% braun		Immer wieder einzelne Eisenkonkretionen 5 mm

Tab. 7.5.: Viereckschanze Laibstadt, Beschreibung von Profil 5, Innenraum mit positiver Anomalie.

Der Boden ist allgemein extrem tonhaltig, sehr schwer und von hohem Wassergehalt.

Im anthropogen unbeeinflussten Außenraum finden wir den Übergang zum C-Horizont bei 40 cm Tiefe.

Im Grabenbereich tritt dieser Übergang bei 142 cm auf. Bereits ab 5 cm sind durch die grau-blaue und braune Fleckung wechselnde Oxidations- und Reduktionsmerkmale feststellbar, was auf schwankende Wassersättigung des Bodens bis fast an die Erdoberfläche schließen lässt. Die taubenblaue Färbung des Bereichs 135-142 cm deutet auf ständig reduzierende Bedingungen und dauerhaften Wasserstand in diesem Bereich hin.

Im Wallbereich ist die alte Oberfläche durch das Krümelgefüge in einer Tiefe von 68 cm zu erkennen. Erwartungsgemäß treten hier, nach der Bodenfarbe zu urteilen, weniger reduzierende Bedingungen auf als im Graben.

Im Innenraum liegt der Übergang zum C-Horizont bei 80 cm Tiefe; ab 45 cm und dann darüber liegend wieder ab 28 cm Tiefe findet man Hinweise (Krümelgefüge) auf alte Oberflächen, die in Etappen vom Wallmaterial überdeckt wurden.

7.4.3. Gesteinsmagnetische Messungen

7.4.3.1. Überblick über die durchgeführten Messungen

Folgende Messungen wurden durchgeführt:

- Suszeptibilitätsmessungen im Labor in Niederlippach am Minispin mit Probengewichten zwischen 20 und 30 Gramm.
- VFTB-Messungen in München (Geräte im Untergeschoss und im 4. Stock), Probengewichte zwischen 250 und 300 Milligramm:
 - IRM erworben bei einem Feld bis zu etwa $400 \cdot 10^3$ A/m bzw. etwa $660 \cdot 10^3$ A/m. Zur Vergleichbarkeit aller Proben werden die IRM-Werte bei einem Feld von etwa $400 \cdot 10^3$ A/m (+/- 1%) angegeben. Die oberflächennäheren Proben erreichten dabei nahezu Sättigung. Die Kurven der aus tiefer gelegenen Bodenbereichen stammenden, schwächeren Proben zeigten wie auch diejenigen bei den Messungen von Papferding deutliche Schwankungen und erwiesen sich bei Werten unterhalb von $0,5 \cdot 10^{-3}$ Am²/kg als nicht zuverlässig.
 - Backfieldmessungen zur Ermittlung des Remanenz-Koerzitivfeldes. Diese Messergebnisse geben ebenfalls nur bei Proben aus den oberen 30 cm (bei Profil 5: bis zu einer Tiefe von 45 cm) einigermaßen glatte Kurven, darunter schwanken sie stärker.
 - Hysteresemessungen
 - Erhitzung der Proben bis 700°C in einem konstanten Feld von 32 mT mit vorheriger Aufmagnetisierung bei 830 mT

IRM-, Hysteres- und Backfieldmessungen wurden unmittelbar hintereinander durchgeführt. Für die thermische Behandlung wurde jeweils frisches Probenmaterial verwendet.

7.4.3.2. Suszeptibilität, IRM und Backfield

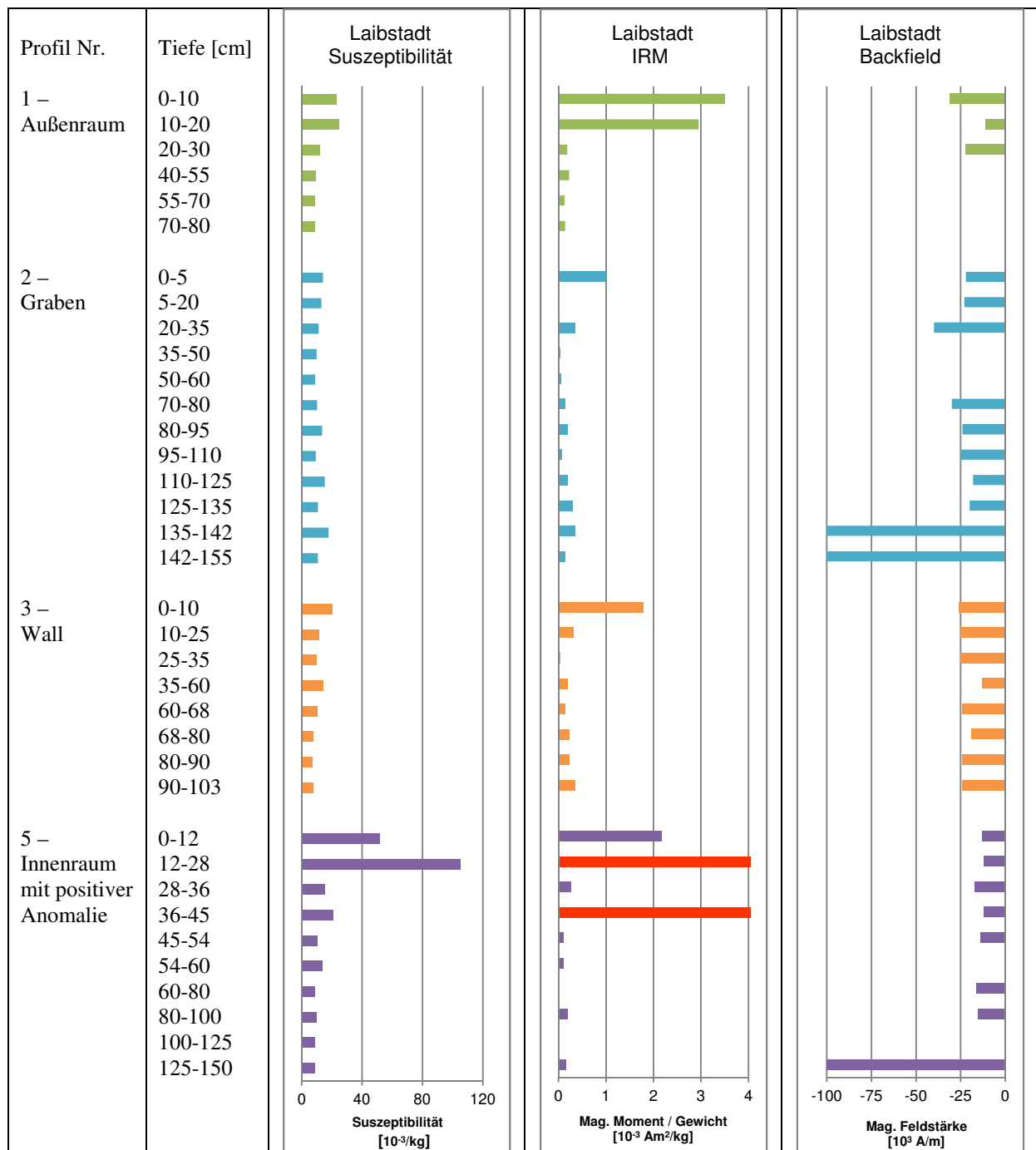


Abb. 7.10.: Viereckschanze Laibstadt, Ergebnisse der Messungen von Suszeptibilität, IRM und Backfield.

Sehr unzuverlässige Messwerte sind hier weggelassen, daher ergeben sich einzelne Lücken in den Diagrammen.

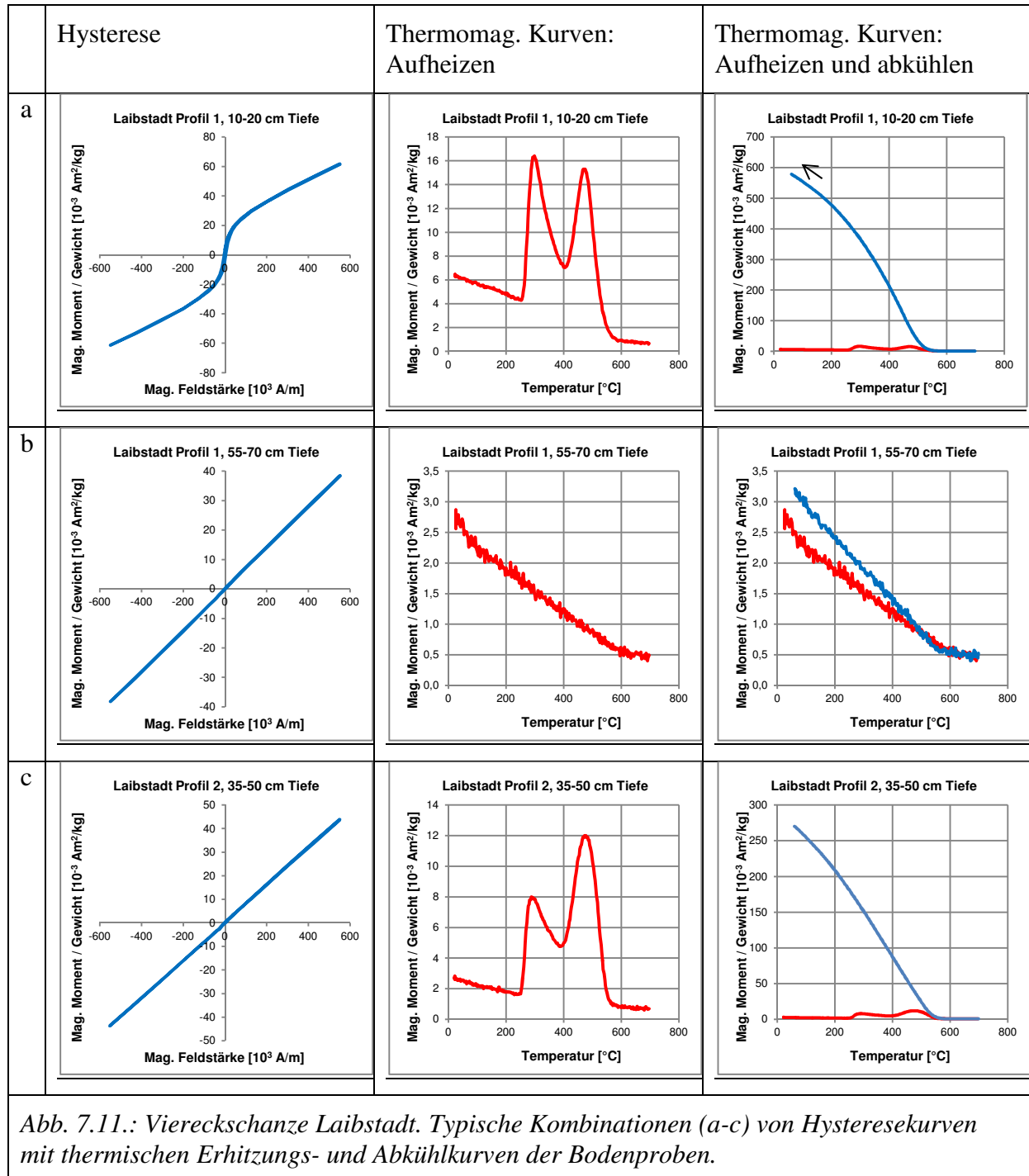
Rot markierte Werte in Profil 5 übersteigen die Werteskala extrem: Bei 12-28 cm beträgt der IRM-Wert $8,68 \cdot 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$, bei 36-45 cm beträgt er $26,20 \cdot 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$.

Ergebnisse:

- Die Suszeptibilitätsmessungen dürften aufgrund ihrer relativ großen Probenmengen zuverlässig sein. Die Ergebnisse zeigen den zu erwartenden Verlauf mit höheren Werten im Oberboden und niedrigeren Werten nach unten hin.
- Im Grabenbereich ist keine Erhöhung der Suszeptibilitätswerte im Oberboden festzustellen, auch die IRM ist nicht stark ausgeprägt. Dies korreliert mit der bodenkundlichen Beobachtung, dass sich die reduzierenden Bedingungen und die häufige Wassersättigung des Untergrunds bis in die obersten Bodenschichten hinein fortsetzen (Kap. 7.4.2.).
- Die Backfieldmessungen zeigen überwiegend Hinweise auf magnetisch weiche Minerale wie Magnetit und Maghemit. Nur die untersten Proben fallen mit ihren negativen Werten aus dem Rahmen. Da sich auffälligerweise aber alle drei Werte ziemlich genau um den Wert 100 kA/m bewegen, mag dies aufgrund der sehr schwachen Proben einen Messfehler darstellen.
- Zu den Backfieldmessungen ist zudem zu bemerken, dass die Zusammensetzung des Bodens sicher unterschiedliche magnetische Phasen beinhaltet, die in ihren magnetischen Eigenschaften beim Vorhandensein von Magnetit oder Maghemit von diesen vermutlich dominiert werden. Dies schließt aber ein Auftreten hochkoerzitiver Phasen wie Goethit nicht unbedingt aus.
- Die IRM zeigt den erwarteten Verlauf mit höheren Werten an der Oberfläche, welche sich nach unten hin wegen der Abnahme ferrimagnetischer Minerale verringern.
- Bei der IRM von Profil 5 (Innenraum mit positiver Anomalie) fallen allerdings die beiden rot markierten Werte stark aus dem Rahmen und übersteigen die Wertegrafik: Bei einer Tiefe von 12-28 cm liegt der IRM-Wert bei $8,68 \cdot 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$, bei der Tiefe 36-45 cm beträgt er $26,20 \cdot 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$.
- Der vorgenannte hohe Wert bei Profil 5, 12-28 cm korreliert mit einem ebenfalls stark erhöhten Wert der Suszeptibilität und lässt sich mit einem vermuteten erhöhten Magnetitgehalt aufgrund eines Abbrands der Bebauung der Viereckschanze in Verbindung bringen. Im Tiefenbereich 36-45 cm ist jedoch nur die IRM, nicht aber die Suszeptibilität erhöht. Dies ist vermutlich darin begründet, dass ferrimagnetische Anteile der Mineralphasen des Bodens inhomogen in diesem Tiefenbereich verteilt sind und in der konkreten Probe, an der die Suszeptibilität gemessen wurde, zufällig nichts von ihnen vorhanden ist.

7.4.3.3. Hysteresekurven und thermische Untersuchungen

Die Kombination der Kurven von Hysteresemessungen und thermischen Untersuchungen lässt sich in drei Typen unterteilen (Abb. 7.11.). Die kompletten Messkurven sind in Anhang 2 zu finden.



Kombinationstypen der Kurven von Hysteresemessungen und thermischen Untersuchungen:

- a) Schmale geschwungene Hysterese, welche auf weiches ferrimagnetisches Material (Magnetit, Maghemit) mit hohem paramagnetischem Anteil hindeutet, in Verbindung mit thermischer Kurve mit (Doppel-) Peaks zwischen 250 und 300°C sowie zwischen 400 und 470°C, die eine chemische Umwandlung während des Erhitzungsprozesses anzeigt. Tritt auf bei folgenden Proben:
 - Profil 1 (Außenraum), 0-10 cm und 10-20 cm;
 - Profil 2 (Graben), 0-5 cm;
 - Profil 3 (Wall), 0-10 cm;
 - Profil 5 (Innenraum / positive Anomalie), 0-12 cm, 12-28 cm und 36-45 cm.
- b) Lineare Hysterese, die auf rein paramagnetische Minerale hinweist, in Verbindung mit thermischer Erhitzungskurve nahezu ohne chemische Umwandlungen. Tritt auf bei folgenden Proben:
 - Profil 1 (Außenraum), 55-70 cm und 70-80 cm (hier kleiner Peak bei etwa 280°C, aber nahezu gleiche Aufheiz- und Abkühlkurven)
 - Profil 4 (Innenraum / positive Anomalie), 100-125 cm und 125-150 cm.
- c) Lineare Hysterese, die auf rein paramagnetische Minerale hinweist, in Verbindung mit thermischer Kurve mit (Doppel-) Peaks, die chemische Umwandlungen während des Erhitzungsprozesses anzeigt. Das magnetische Moment der Probe ist bei der Abkühlkurve um ein Vielfaches höher als bei der Aufheizkurve.

Diese Kurvenkombination tritt auf bei allen bisher nicht genannten Proben, ist also bei weitem am häufigsten vertreten. Dabei ist teilweise auch nur einer der beiden Peaks deutlich ausgeprägt und der andere nur angedeutet; die Probe Profil 5, 60-80 cm zeigt keine Peaks, aber dennoch eine vielfach erhöhte Magnetisierung in der Abkühlkurve.

7.4.3.4. Interpretation der gesteinsmagnetischen Messungen

Die Kurvenkombination c) war auch bei der Viereckschanze von Papferding im Grabenbereich häufig vertreten (Abb. 5.18.). Die Peaks liegen dort zwischen 280 und 330°C sowie zwischen 420 und 500°C, also etwa um 30°C höher als hier. Temperaturunterschiede solcher Art sind bei thermischen Erhitzungsexperimenten nicht ungewöhnlich (HANESCH ET AL. [2006]). Sie sind vermutlich in der Kristallinität der jeweiligen Minerale, in der Menge der jeweils verfügbaren organischen Materie und den spezifischen chemischen Bodenzusammensetzungen der beiden Lokationen begründet.

Für die Lokation Laibstadt lässt sich in Anlehnung an Papferding feststellen:

- In den oberflächennahen Schichten wurde eine niederkoerzitive ferrimagnetische Phase nachgewiesen, also Magnetit oder Maghemit. Diese ist in den Hysteresemessungen der tieferen Bodenschichten nicht mehr erkennbar.
- Ferrimagnetische Minerale wurden ebenfalls in Profil 5 (Lokation der positiven Anomalie) bei 12-28 cm sowie bei 36-45 cm festgestellt, die offensichtlich durch die Einwirkung von Feuer entstanden.
- In allen Bodenschichten herrscht eine paramagnetische Phase vor. Hierbei kann es sich um Lepidokrokit (γ -FeOOH), Ferrihydrit ($5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) oder Siderit (FeCO_3) handeln. Aufgrund der chemischen Umwandlung bei 250°C, welche der Umwandlung bei dieser Temperatur von Lepidokrokit in Maghemit entspricht, wird Lepidokrokit als paramagnetische Phase identifiziert.

- Ab 300°C wird der entstandene Maghemit in Hämatit umgeformt, woraus ein abrupter Abfall der Magnetisierung resultiert. Bei 400°C schließlich erfolgt die Umwandlung des Hämatit in Magnetit mit einem weiteren deutlichen Messwertanstieg, bis bei der Curietemperatur des Magnetit bei nahezu 580°C die Magnetisierung schließlich ganz abfällt. Auch eine Umwandlung des in Böden häufigen Goethit in Maghemit ist hierbei eine mögliche Erklärung.
- Die Umwandlungsprozesse können nur bei Anwesenheit von organischem Material stattfinden. Da sich der Graben im Lauf der letzten 2000 Jahren sukzessiv verfüllte, bildeten alle seine Schichten im Lauf dieser Zeit die „Oberfläche“, daher ist hier überall die Anwesenheit von organischen Stoffen anzunehmen. Auch im heute noch vorhandenen Wallrest, dem früheren unteren Wallbereich, sind mit Sicherheit Reste des während der Errichtung der Anlage eingebachten früheren Oberbodens mit organischer Materie aufzufinden. In den unteren Schichten von Profil 1 (Außenraum) und Profil 4 (Innenraum) ist dagegen vermutlich kein organisches Material vorhanden. Somit können hier die oben angesprochenen chemischen Umwandlungsprozesse nicht stattfinden, in deren Verlauf sich die charakteristischen Doppelpeaks ausbilden. Hier wird nur unter dem Einfluss des während der Messung angelegten schwachen Feldes von 32 mT eine gewisse reversible Magnetisierung der chemisch unveränderten paramagnetischen Substanzen erreicht.

Unter momentaner Ausklammerung der Brandsituation lässt sich also zusammenfassend sagen, dass an der Lokation Laibstadt nur an den obersten Bodenschichten kleine Mengen an Magnetit aufzufinden sind. Der sehr tonreiche, Wasser stauende Boden lässt aufgrund seiner braun-grauen bis taubenblauen Färbung auf häufig vorliegende reduzierende Bedingungen schließen, welche zur Auflösung des Magnetit führen (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL [2010], S. 339); dieser Mechanismus ist insbesondere im Grabenbereich bis nahe an die Oberfläche festzustellen. Bei zeitweilig vorliegender Sauerstoffzufuhr kann sich das gelöste Fe^{2+} dann als Lepidokrokit wieder absetzen.

Zur Brandsituation: An Profil 5, der Beprobungsstelle am Ort einer stark positiven magnetischen Anomalie im Magnetogramm, liegen spezielle Bedingungen vor. Hier sind in Tiefen von 12-28 cm sowie 36-45 cm stark erhöhte Werte der IRM zu finden sowie Hystereseverläufe, die klar auf ferrimagnetische Minerale hinweisen. Hier kann also ein ehemaliger Brandherd lokalisiert werden, an dem sich durch die Einwirkung von Feuer Maghemit bildete, siehe Kapitel 2.3.3.1 (Le Borgne-Effekt). Bodenkundlich findet man in eben diesen Tiefen durch das Vorliegen von Krümelgefüge den Hinweis auf ehemalige Oberflächen, die in Etappen vom Wallmaterial überdeckt wurden (Kapitel 7.4.2.). Auch durch die magnetische Signatur des ehemaligen Hauptgebäudes der Viereckschanze (Abb. 7.4., A/B) wurde der mindestens zweimalige Abbrand von Gebäuden in der Viereckschanze nachgewiesen. Daher liegt es nahe, diese beiden Brandsituationen mit den beiden Bodenschichten in 12-28 cm bzw. 36-45 cm Tiefe zu korrelieren, die jeweils die damaligen Oberflächen gebildet haben könnten.

Kapitel 8: Ergebnisse der magnetometrischen und bodenkundlichen Untersuchungen

Der folgende Überblick über den Ablauf der vorliegenden Dissertation verdeutlicht die in den Kapiteln 3 mit 7 erarbeiteten neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse.

8.1. Korrelation von Grabenanomalien mit Bodentypen

In den Magnetometerprospektionen bilden sich die Anomalien der Viereckschanzengräben nur in einem Drittel aller Fälle (9 von 27 Anlagen) als gut interpretierbare positive Anomalie heraus, siehe Kapitel 3. Die anderen Anlagen zeigen Grabenanomalien in schwach erkennbarer positiver oder auch in negativer Form; auch ein Wechsel zwischen positiven und negativen Anomalieteilen innerhalb des Grabens einer Viereckschanze ist möglich. In vier der Anlagen war keinerlei Anomalie erkennbar. Bei sechs Anlagen waren keine Aussagen über die Gräben möglich, da diese aufgrund lokaler Besonderheiten wie z. B. störenden Baum- und Strauchbewuchses jeweils nicht prospektiert werden konnten.

Die Anomalientypen wurden mit Informationen zu den Bodentypen der einzelnen Anlagen korreliert. Dabei reichen die geologischen Untergründe von Moränenmaterial, würmzeitlichen Schottern und Flussschottern über Flussmergel, Molasse, sandige und tonige Lehme bis hin zu Löss und Lösslehm. Daraus hatten sich als Bodentypen entwickelt: Braunerde und Parabraunerde, Pseudogley, schwerer bis toniger Lehm und Pararendzina.

Im Ergebnis zeigte sich, dass deutlich erkennbare positive Anomalien primär auftreten bei gut wasserdurchlässigen Böden, die aus Parabraunerde, Braunerde, Pararendzina und sandigem Lehm gebildet werden. Ein Wechsel der Anomalietypen zwischen positiven und negativen Anteilen tritt auf bei Braunerde bzw. Parabraunerde aus Lösslehm und bei sandigem Lehm auf Kiesgrundlage. Bei negativen Anomalien findet man Braunerde, Parabraunerde oder Pseudogley-Braunerde über Fließerde, Löss oder Lösslehm, teilweise über Schotteruntergrund. Bei vollständig fehlenden Grabenanomalien dominieren mit drei von vier prospektierten Beispielen eindeutig die wasserstauenden Böden: Hier treten schwerer toniger Lehm, Pseudogley bzw. eine lokal staunasse Braunerde auf.

8.2. Archäologische Befunde

Als Zusatzinformationen aus dem Katalog der Viereckschanzen ist in Kapitel 4 ein Überblick der archäologischen Befunde zusammengestellt. In Tabelle 4.1. sind die aus den Magnetogrammen und Luftbildern erkennbaren Größen und Eckwinkel aufgeführt. Zudem bietet Tabelle 4.2. einen Überblick über die Gebäude, Pfostenreihen, Gruben bzw. Grubenhäuser und Schächte, die aus den Prospektionsergebnissen hervorgehen. Einzelheiten zu den jeweiligen Befunden sind aus den Interpretationsplänen im Katalog der Viereckschanzen zu entnehmen.

Im Hinblick auf sein archäologisch wie auch geophysikalisch verwertbares Ergebnis ist besonders die im Rahmen der vorliegenden Arbeit neu prospektierte Anlage von Laibstadt hervorzuheben, auf die in Kapitel 7 näher eingegangen wird. Diese Schanze liegt im offenen Grünland und ist mit Wallhöhen bis zu etwa 1,5 Meter noch gut als obertägig erkennbar. Auch die Zugangsöffnung in der Mitte des östlichen Walles ist noch gut erhalten. Der Graben dieser Schanze ist im Magnetogramm praktisch nicht erkennbar, es hatte sich weder eine positive noch eine negative magnetische Anomalie herausgebildet. Umso überraschender ist die

Klarheit des Prospektionsergebnisses im Hinblick auf die Innenbebauung. Besonders hervorzuheben ist hier das dem Eingang der Anlage gegenüber liegende zweiphasige Hauptgebäude sowie weitere Gebäude- und Grubenstrukturen. Die Intensitäten der magnetischen Anomalien bis zu einigen Dutzend Nanotesla weisen eindeutig auf den Abbrand dieser Gebäude hin, da nur bei der Einwirkung von Feuer derart hohe magnetische Werte erreicht werden können.

8.3. Ergänzende Geländemessungen und Laboruntersuchungen

An drei Anlagen wurden als Ergänzung zu den Magnetometerprospektionen zusätzliche Untersuchungen durchgeführt.

Bei der Viereckschanze von Papferding (Kapitel 5) wurde durch den Wall- und Grabenbereich ein senkrecht dazu verlaufender Grabungsschnitt von 17 Metern Länge angelegt; die Anlage von Fehmbach (Kapitel 6) wurde aufgrund des geplanten Kiesabbaus komplett ausgegraben. An beiden Lokationen lagen Querprofile durch den Graben, bei Papferding auch durch den unter dem Wall liegenden Bereich offen zutage. Dies ermöglichte Suszeptibilitätsmessungen an den Profilwänden, Untersuchung der Bodenhorizonte sowie die Beprobung für ergänzende Labormessungen.

Bei der Anlage von Laibstadt (Kapitel 7) war keine Grabung möglich, aber Bodensondagen lieferten wertvolles Probenmaterial und Erkenntnisse über den Aufbau der oberen Bodenschichten bis in gut eineinhalb Meter Tiefe.

Bei allen drei Schanzen lag ein besonderer Fokus auf die Erfassung der potentiell oxidierenden bzw. reduzierenden Bodenbereiche.

8.4. Ursachen fehlender bzw. negativer Grabenanomalien

8.4.1. Auflösung ferrimagnetischer Minerale im Grabenbereich

Als wichtigste Ursache für den Verlust der erwarteten positiven Anomalie im Grabenbereich wurde die Auflösung ferrimagnetischer Minerale, insbesondere des Magnetit, in reduzierenden Zonen des Viereckschanzengrabens identifiziert. Die Argumentationskette soll hier noch einmal kurz umrissen werden.

Wie bei der Anlage von Papferding anhand der Suszeptibilitätsmessungen im Gelände (Kapitel 5.4.) sowie der Laborergebnisse von Suszeptibilität, IRM und NRM (Kapitel 5.5.3.2.) festgestellt werden konnte, zeigen die Messwerte insbesondere in der am stärksten reduzierten blaugrauen Schicht Nr. 21, also dem Reduktionshorizont Gr im Graben, die niedrigsten Werte. Auch in anderen Schichten, insbesondere im Oberboden, sind die Messwerte im Grabenbereich niedriger als im wenige Meter nebenan liegenden Bereich unter dem ehemaligen Wall. Diese Untersuchungen lassen an sich schon eine negative Anomalie des Grabens im Vergleich zum Wallbereich erwarten (Kapitel 5.5.3.3.).

Weitere Erkenntnisse können aus der Auswertung der Hysteresekurven sowie der thermischen Aufheizungs- und Abkühlungskurven gezogen werden (Kapitel 5.5.4.). Nach den Hysteresekurven lassen sich ferrimagnetische Minerale praktisch nur im Oberboden in geringer Menge sowie in einer unter dem Wallbereich liegenden Brandschicht (bronzezeitliche Grubenverfüllung) nachweisen. In allen anderen Schichten treten nur paramagnetische Minerale auf. Diese sind anhand gesteinsmagnetischer Messungen nicht direkt nachweisbar. Allerdings bilden sie das Ausgangsmaterial für chemische Umwandlungen bei Temperaturänderungen.

So zeigen die Ergebniskurven der thermischen Erhitzungsexperimente bis zu 700°C teilweise Mineraländerungen während der Aufheizphase. Insbesondere wurde bei einigen Proben aus denjenigen Zonen des Grabens, die einer teilweisen Sauerstoffzufuhr ausgesetzt sind, ein starker Anstieg der Magnetisierung bei 280 °C festgestellt. Dies weist klar auf die Umwandlung von Lepidokrokit in Maghemit hin, so dass also Lepidokrokit als paramagnetisches Ausgangsmaterial identifiziert werden konnte. Auch die rotbraune Fleckung dieser Bodenbereiche lässt bei der paramagnetischen Phase eher auf Lepidokrokit als auf den dunkelgrauen Ferrihydrit schließen.

Durch die gesteinsmagnetischen Untersuchungen konnte somit belegt werden, dass der ursprünglich in archäologischen Böden und insbesondere im Grabenbereich vorhandene Magnetit in reduzierenden Zonen des Bodens aufgelöst worden ist. Das Eisen liegt im Boden daraufhin in einer mobilen Form als Fe^{2+} vor, kann in andere Bodenschichten transportiert werden und in Zonen mit zeitweiliger Sauerstoffanreicherung oxidiert und wieder in feste Minerale eingebaut werden. Dieser Vorgang bildet nun aber nicht mehr Magnetit, sondern vorzugsweise paramagnetische Minerale wie den hier nachgewiesenen Lepidokrokit.

Die Messergebnisse der Proben von Laibstadt bestätigen die Beobachtungen von Papferding. Die Hysteresekurven zeigen auch hier nur in den obersten Bodenschichten, bis etwa 20 cm Tiefe, sowie in einer Brandschicht ferrimagnetische Minerale, ansonsten dominieren paramagnetische Bodenbestandteile. Auch bei den Messungen von Laibstadt zeigen sich die charakteristischen Peaks in den Temperaturkurven, welche auf Lepidokrokit als paramagnetische Phase hinweisen.

Hierbei ist festzuhalten, dass die Voraussetzung für die Auflösung des ferrimagnetischen Magnetit das Auftreten von sauerstoffarmen, reduzierenden Bodenbereichen ist, also konkret das Vorhandensein von Stauwasserbereichen insbesondere im Graben einer Viereckschanze.

8.4.2. Verfüllung des Grabens mit diamagnetischem Gestein

Bei der Magnetometerprospektion an der Viereckschanze von Fehmbach (Kapitel 6) tritt eine spezielle Ausprägung der Grabenanomalie auf: Hier wechseln sich schwach positive und neutrale Bereiche ab. Am Ort des Profilschnitts C-D durch den südlichen Graben zeigt sich im Magnetogramm sogar der ungewöhnliche Fall des unmittelbaren Wechsels von positiver und negativer Anomalie in der Form, dass zur Wallseite des Grabens, also zum inneren Bereich der Schanze hin, niedrigere magnetische Feldwerte auftreten als in der direkten Umgebung; an der äußeren Seite des Grabens ist die Anomalie dagegen leicht positiv. Zu bemerken ist hierbei, dass es sich bei diesem Effekt um eine lokale Besonderheit an dieser Stelle handelt und nicht um das regelhaft begleitende Minimum im Norden jeder auf induzierter Magnetisierung beruhenden Anomalie. Dieses gleichförmig auftretende Minimum ist z. B. entlang des nördlichen und südlichen Grabenverlaufs bei der Viereckschanze von Manndorf gut zu beobachten, siehe Anhang 3 Nr. 27.

Bei den gesteinsmagnetischen Untersuchungen des Grabenbereichs zeigt sich zwar auch eine Verminderung ferrimagnetischer Minerale, allerdings ist diese nicht so eindeutig wie in Papferding oder Laibstadt. Auch sind Reduktionszonen im Graben wegen des gut wasser-durchlässigen Untergrundes von Fehmbach nicht stark ausgeprägt. Die Erklärung für die lokal negativ auftretende Anomalie liegt hier vor allem in der Zusammensetzung des ehemaligen Wallmaterials der mittlerweile verebneten Anlage, welches aus dem Aushubmaterial des Grabens der Viereckschanze bestand. Der geologische Untergrund der Viereckschanze und damit auch das frühere Wallmaterial wird gebildet von würmzeitlichen Schottern, überdeckt nur von wenigen Dezimetern Verwitterungslehm. Suszeptibilitätsmessungen im Labor an einigen typischen Gesteinsbrocken dieses kiesigen Materials zeigen, dass es sich zum großen

Teil um diamagnetisches Quarzitgestein handelt (Kapitel 6.3.). Dieses Ergebnis ist gut mit den direkt am Profilschnitt C-D durchgeführten Suszeptibilitätsmessungen zu korrelieren: An der wallzugewandten Seite des Grabens ist optisch ein größeres Kiespaket zu erkennen, welches mit seinen diamagnetischen Eigenschaften die negative Anomalie an dieser Stelle zu erklären vermag. Zur Außenseite des Grabens hin besteht die Verfüllung eher aus in situ gebildetem Bodenmaterial, welches teilweise ferrimagnetische Eigenschaften zeigt und daher im Vergleich zur Umgebung eine schwach positive Anomalie bildet.

8.5. Archäologische Interpretation

Die Verfüllung des Grabens mit diamagnetischem Gestein wie in Fehmbach ist an die Voraussetzung gebunden, dass sich das Wallmaterial und damit der Untergrund aus solchem quarzithaltigem Gestein zusammensetzt. Somit stellt diese Erklärung von negativen Prospektionsergebnissen sicher einen Spezialfall dar, der aber in Bayern in Gebieten wie der Münchner Schotterebene oder auf Kiesterrassen entlang der Donau und anderer größerer Flussläufe dennoch häufiger auftreten kann. Eine deutliche negative Anomalie weist in diesen Fällen auf Stellen im Grabenbereich hin, an denen ein größeres Kiespaket relativ schnell vom Wall in den Graben verlagert wurde, bevor sich zwischen dem kiesigen Verfüllmaterial des Grabens größere Bodenbildungszonen ausprägen konnten. Archäologisch gesehen bedeutet dies ein schnelles Abrutschen des Walles an diesen Stellen, sei es nun erosionsbedingt oder absichtlich erfolgt. Bei den im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchten Prospektionen könnte diese Ursache bei der Anlage von Plattling-Pankofen (Anhang 3, Anlage Nr. 26) ausschlaggebend für die negative magnetische Anomalie des Grabens sein.

Eine umfassendere Erklärung für negative oder archäologisch nicht interpretierbare Anomalien im Grabenbereich ist die Auflösung des ferrimagnetischen Magnetit in sauerstoffarmen, reduzierenden Bodenbereichen. Dies ist untrennbar verbunden mit Stauwasserzonen im Graben, was wiederum auf die dauerhafte oder zumindest regelmäßige Wasserverfüllung des Grabens insbesondere bei wasserstauenden Bodentypen schließen lässt. Im Gegensatz zu den hallstattzeitlichen Kelten, welche zur Errichtung ihrer Herrenhöfe trockene Bodenbereiche oder leichte Höhenlagen mit gutem Wasserabfluss bevorzugten, scheuten die latènezeitlichen Kelten offensichtlich feuchte Lagen und wassergesättigte Böden bei der Standortauswahl für den Bau der Viereckschanzen nicht mehr.

Ob die überwiegende Wasserverfüllung des Grabens sogar gewollt war oder absichtlich erfolgte, lässt sich aus den Messungen nicht eindeutig feststellen. Schließlich zeigen sich doch bei einem Drittel der untersuchten Viereckschanzen gut ausgeprägte positive Graben-anomalien, die mit Lagen auf wasserdurchlässigen Böden wie Braunerden und sandigen Lehmen korrelieren (Kapitel 3.2.). Dies lässt in diesen Fällen auf sauerstoffreiche oxidierende Bodenbedingungen und damit auf eher trockene Gräben schließen. Allerdings gibt es an einzelnen Anlagen Hinweise im Magnetogramm auf Wasserzuläufe zum Graben, so etwa bei der Schanze von Oberframming (Anhang 3, Nr. 24). Ein Gräbchen mit positiver magnetischer Anomalie schließt sich dort direkt an den ebenfalls positiv ausgeprägten Graben der Viereckschanze an. Die leichte Hanglage dieser Schanze nahe der Abbruchkante zur Isar legt einen schnellen Wasserabfluss talabwärts nahe. Bei ständiger Wassernachlieferung aus einer hangaufwärts gelegenen Quelle könnte aber auch dieser Graben dauerhaft wasserführend gewesen sein. Das ständig ausgetauschte, sauerstoffreiche Wasser könnte dann zu oxidierenden chemischen Bedingungen im Graben und damit zur Erhaltung des primären Magnetit geführt haben.

Kapitel 9. Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Dissertation war die Beantwortung der bislang ungeklärten Frage, warum sich magnetische Anomalien in den Gräben latènezeitlicher Viereckschanzen nicht immer wie erwartet als positive, sondern oft auch als negative Anomalien darstellen bzw. warum manchmal keine interpretierbare Anomalie im Magnetogramm zu erkennen ist. Dieses Ziel konnte erreicht werden.

Wichtige Arbeitsschritte hierzu waren

- die Aufstellung eines Überblicks über alle Magnetometerprospektionen an Viereckschanzen in Katalogform;
- die Korrelation der Grabenanomalien mit Bodentypen;
- ergänzende gesteinsmagnetische Untersuchungen an drei ausgewählten Lokationen.

Seit 1982 waren am Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege bereits 15 Viereckschanzen mit der Methode der Magnetometerprospektion untersucht worden. Einige dieser Prospektionen wiesen keine herkömmlich interpretierbaren Ergebnisse auf und waren bisher nicht weiter bearbeitet worden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden alle Prospektionsergebnisse neu bearbeitet, vor dem Hintergrund gesteinsmagnetischer Untersuchungen an archäologischen Böden analysiert und interpretiert.

Die Reihe der Messungen an Viereckschanzen konnte im Rahmen dieser Arbeit um zwölf weitere Magnetometerprospektionen ergänzt werden. Das wichtigste Auswahlkriterium für diese zusätzlich zu untersuchenden Anlagen war die breite Streuung unterschiedlicher geologischer Lagen und Bodentypen.

Zusammen mit den früher durchgeführten Prospektionen bilden sie die Basis für den Katalog der Viereckschanzen (Anhang 3), in denen zu jeder der insgesamt 27 Anlagen ein Luftbild, das Magnetogramm und der archäologische Interpretationsplan vorgelegt werden. Ferner sind Informationen über Geologie, Bodentyp, Geländeart, Erhaltungszustand sowie Nutzungsform seit dem Zeitpunkt der Uraufnahmen Mitte des 19. Jahrhunderts zusammengefasst. Dieser Katalog bietet zum ersten Mal einen Überblick über sämtliche bis 2011 am Landesamt für Denkmalpflege durchgeführten Prospektionen an Viereckschanzen in Bayern. Er liefert eine umfassende Datengrundlage für die Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit sowie für weitere zukünftige archäologische Forschungsansätze.

Zur Klärung der Frage, in welcher Anomalieform (positiv, negativ oder neutral) sich die Gräben der Viereckschanzen in den Magnetometerprospektionen im Vergleich zur Umgebung abbilden, wurden die Prospektionsergebnisse zunächst mit den jeweils am Messort vorliegenden Bodentypen korreliert, siehe Kapitel 3. Es zeigte sich, dass gut interpretierbare positive Anomalien vor allem bei gut wasserdurchlässigen Bodentypen wie Braunerde und sandigem Lehm auftreten. Negative Anomalien findet man bei den unterschiedlichsten Bodentypen wie Braunerde, Parabraunerde oder Pseudogley-Braunerde über Fließerde, Löss oder Lösslehm, teilweise über Schotteruntergrund. Diejenigen Fälle, in denen keinerlei magnetische Anomalie im Messbild erkennbar ist, korrelieren auffällig mit stark wasserstauenden Böden wie schwerem tonigem Lehm und Pseudogley.

Zusätzliche Untersuchungen wurden an den drei folgenden Viereckschanzen durchgeführt:

- In Papferding (Kapitel 5) und Fehmbach (Kapitel 6) ermöglichten offene Grabungsschnitte die Durchführung von Suszeptibilitätsmessungen in situ, sowie Beprobung mit darauf folgenden gesteinsmagnetischen Labormessungen.
- In Laibstadt (Kapitel 7) war keine Grabung möglich, die Anlage wurde aber wegen ihres auffälligen Kontrastes zwischen starker positiver magnetischer Anomalien der

Innenbebauung und nahezu fehlender Anomalien im Grabenbereich für Bohrsondagen und gesteinsmagnetische Laboruntersuchungen ausgewählt.

Die gesteinsmagnetischen Untersuchungen konnten den Nachweis liefern, dass die wichtigste Ursache für den Verlust der erwarteten positiven Anomalie im Grabenbereich in der Auflösung ferrimagnetischer Minerale liegt (siehe Kapitel 5.5. und 7.4. sowie die zusammenfassende Interpretation in Kapitel 8.4.). Der ursprünglich in archäologischen Böden gebildete Magnetit wird in reduzierenden Bodenbereichen aufgelöst. Das Eisen liegt im Boden daraufhin in einer mobilen Form als Fe^{2+} vor und wird nach dem Transport in Zonen mit zeitweiliger Sauerstoffanreicherung oxidiert und wieder in feste Minerale eingebaut, nun vorzugsweise in Minerale wie Lepidokrokit oder Ferrihydrit, welche aufgrund ihrer paramagnetischen Eigenschaften keine Beiträge zur Magnetisierung des Bodens liefern können. Eine wichtige Voraussetzung für diese Transformationskette ist das Auftreten von sauerstoffarmen, reduzierenden Bodenbereichen, also konkret das Vorhandensein von Stauwasserbereichen insbesondere im Graben einer Viereckschanze. Dieser Umstand führt archäologisch gesehen zum Nachweis der regelmäßigen oder dauerhaften Wasserverfüllung der Gräben (siehe Kapitel 8.5.), zumindest in denjenigen Fällen, in denen keine positive Anomalie im Magnetogramm vorliegt.

Eine weitere Ursache für die Abschwächung der positiven Anomalie bzw. die Ausprägung einer negativen Anomalie im Grabenbereich ist die Verfüllung des Grabens mit diamagnetischem Gestein, wie dies vor allem bei Untergründen aus stark quarzithaltigen Schottern auftreten kann, siehe Kapitel 6.3.

Fazit und Empfehlungen

Prospektionen an Viereckschanzen und insbesondere ihrer Gräben sind aufgrund ihrer Variabilität generell schwierig auszuwerten. Dennoch können hier aufgrund der in der vorliegenden Arbeit gewonnenen Erkenntnisse Hinweise zur Auswertung gegeben werden.

Die Gräben bilden sich magnetometrisch in sehr unterschiedlicher Form ab, was bei der Interpretation des Grabenverlaufs berücksichtigt werden muss:

In gut wasserdurchlässigen Böden sind vorwiegend positive Grabenanomalien zu erwarten. Wasserstauende Böden neigen dagegen zur Ausprägung fehlender oder im Vorzeichen wechselnder magnetischer Anomalien; im Kontrast zum stärker magnetischen Oberboden der unmittelbaren Umgebung sind auch negative Anomaliebereiche möglich. Bei Anlagen auf Schotteruntergrund ist die gesamte Bandbreite von positiven (Feldmoching, Anhang 3 Nr. 12) über nicht erkennbaren (Aubing, Anhang 3 Nr. 8) bis hin zu negativen Anomalien (Fehmbach, Kapitel 6.2.) zu erwarten. Mit ortsfremdem Material wie rezentem Bauschutt verfüllte Grabenteile zeigen sich als magnetisch unruhige, gestörte Abschnitte. Dagegen kann auch ein magnetisch sehr ruhiger Bereich im Magnetogramm mit relativ wenigen oberflächennahen, kleinteiligen Störungen (Laibstadt, Kapitel 7.3.) auf die Graben-Wall-Zone hindeuten.

Wo immer möglich, sollten Zusatzinformationen eingeholt werden: Vor allem Kenntnisse über Geologie und Bodentypus sowie die Lage im Gelände sollten zur Auswertung des Magnetogramms beitragen. Ein digitales Geländemodell kann die Festlegung des Verlaufs von Wall und Graben einer nicht komplett verebneten Viereckschanze unterstützen, wobei allerdings in jedem Fall die mittlerweile erhältlichen Daten der Auflösung im 1-Meter-Gitter benutzt werden sollten. Nicht zuletzt liefern ergänzende Messungen der Suszeptibilität in situ sowie gesteinsmagnetische Untersuchungen an nahezu zerstörungsfrei aus dem Boden entnommenen Bohrproben entscheidende Hinweise zur korrekten Interpretation der Magnetometerprospektionen.

Literaturverzeichnis

- AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN [2005]: Bodenkundliche Kartieranleitung. Hrsg. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland, 5. Auflage, Hannover
- AITKEN, M. J. [1958]: Magnetic prospecting I, *Archaeometry*, 1, 24-29
- AITKEN, M. J. [1974]: *Physics and Archaeology*, Clarendon Press, Oxford, 291 S.
- AK BODENSYSTEMATIK [1998]: Systematik der Böden und der bodenbildenden Substrate Deutschlands. – Mitteilungen der Dt. Bodenkundlichen Gesellschaft 86, 180 S.
- AKIMOTO ET AL. [1957]: Magnetic properties of the $\text{Fe}_2\text{TiO}_4 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ system and their change with oxidation. *J. Geomagn. Geoelectr.* 9, 165-178.
- ALEXANDROV, E. B. & BONCH-BRUEVICH, V. A. [1992]: Optically pumped atomic magnetometers after three decades, *Optical Engineering* 31(4), 711-717
- AMBS, R. [1999]: Erste Ergebnisse der Grabungen in der Viereckschanze von Beuren. *Arch. Jahr Bayern* 1998, 62 ff.
- AMBS, R. [2011]: Die keltische Viereckschanze bei Beuren. *Berichte zur Archäologie im Landkreis Neu-Ulm und in den angrenzenden Gebieten*, Band 4. Landkreis Neu-Ulm, Kreisarchäologie.
- ANGENHEISTER, G., & SOFFEL, H. [1971]: *Gesteinsmagnetismus und Paläomagnetismus*, Bornträger-Schweizerbart-Verlag, Stuttgart
- ASPINALL, A., GAFFNEY, C. & SCHMIDT, A. [2008]: *Magnetometry for Archaeologists*. AltaMira Press, Lanham - New York - Toronto – Plymouth
- BANERJEE, S.K., OCHES, E. A. & SOLHEID, P. A. [1997]: Magnetic properties reveal sub-orbital climate change periodicities in Alaskan loess. *EOS Transactions*, 78, F23
- BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT [1996]: *Geologische Karte von Bayern 1:500000*, München
- BEGÉT, J. E. & HAWKINS, D. B. [1989]: Influence of orbital parameters on Pleistocene loess deposition in central Alaska. *Nature*, 337, 151-153
- BECKER, H. [1994]: Vom Nanotesla zum Picotesla - ein neues Fenster zur magnetischen Prospektion archäologischer Denkmäler. *Arch. Jahr Bayern*, 1993, 185-187.
- BECKER, H. (Hrsg.) [1996A]: *Archäologische Prospektion, Luftbildarchäologie und Geophysik. Arbeitshefte des Bayer. Landesamtes für Denkmalpflege* 59. München
- BECKER, H. [1996B]: Kultplätze, Sonnentempel und Kalenderbauten aus dem 5. Jahrtausend vor Chr. – Die mittelnolithischen Kreisanlagen in Niederbayern. In: *Archäologische Prospektion. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege* Band 59, pp. 100-122, München
- BECKER, H. [1996C]: Komplexe Grabenwerke der Hallstattzeit. In: *Archäologische Prospektion. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege* Band 59, pp. 159-164, München
- BECKER, H. [1996D]: Vergleich von Fluxgate-Gradiometer mit Cäsium-Magnetometer in der archäologischen Prospektion. In: *Archäologische Prospektion. Arbeitshefte des*

- Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege Band 59, pp. 273-276, München
- BECKER, H. [1996E]: Archäologische Prospektion und Luftbildarchäologie. In: Archäologische Prospektion. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege Band 59, pp. 15-18, München
- BECKER, H. [1996F]: Magnetik im Picotesla Bereich – ein neues Fenster zur magnetischen Prospektion archäologischer Denkmäler. In: Archäologische Prospektion, Luftbildarchäologie und Geophysik. Arbeitshefte des Bayer. Landesamtes für Denkmalpflege 59, München
- BECKER, H. [1997]: Entwicklung und Einsatz von Multi-Sensor-Konfigurationen zur magnetischen Prospektion archäologischer Denkmäler, Arch. Jahr Bayern 1996, 195-197
- BECKER, H. [1999]: Ultra High Resolution Caesium Magnetometry at Monte da Ponte, Concelho Evora, Portugal 1994-1996. In: Archaeological Prospection. Third International Conference on Archaeological Prospection, Munich 9.-11. September 1999. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Band 108, München.
- BECKER, H. [2001]: Prospektion und Visualisierung der spätkeltischen Viereckschanze von Weiltingen. Aus: Das arch. Jahr in Bayern 2000, 54 ff.
- BERGHAUSEN, K. [2008], Magnetometerprospektion an der spätkeltischen Viereckschanze von Manndorf, Gemeinde Buchhofen, Landkreis Deggendorf, Niederbayern. Arch. Jahr Bayern 2007, 56 ff.
- BERGHAUSEN, K. [2009]: Den Anomalien auf der Spur – Ebenen der magnetischen Prospektion am Beispiel der Viereckschanze Fehmbach. Arch. Jahr Bayern 2008, 52 ff.
- BERGHAUSEN, K. [2010a]: Magnetometerprospektion an der Viereckschanze von Stephansposching-Fehmbach, Lkr. Deggendorf. Aus: SCHMOTZ, K. (Hrsg.), Vorträge des 28. Niederbay. Archäologentages, 203-213
- BERGHAUSEN, K. [2010b]: Magnetische Signale des Feuers – Prospektion an der spätkeltischen Viereckschanze von Laibstadt. Arch. Jahr Bayern 2009, 80-83.
- BERGHAUSEN, K. [2010c]: Magnetometerprospektion an der spätkeltischen Viereckschanze von Hechendorf a. Pilsensee/Güntering. Bericht der Bayerischen Bodendenkmalpflege 51, 197 f.
- BERGHAUSEN, K. [2011]: Magnetometerprospektion an der Viereckschanze von Beuren. In: AMBS, R.: Die keltische Viereckschanze bei Beuren. Berichte zur Archäologie im Landkreis Neu-Ulm und in den angrenzenden Gebieten, Band 4. Kreisarchäologie Neu-Ulm.
- BERGHAUSEN, K. & KRAUSE, H. [2007a], Dokumentierter Denkmalverlust - Prospektion an der Viereckschanze von Papferding. Arch. Jahr Bayern 2006, 78 ff.
- BERGHAUSEN, K. & KRAUSE, H. [2007b], Dokumentierter Denkmalverlust - Prospektion an der Viereckschanze von Papferding. Denkmalpflege Informationen 138, 38 ff.
- BERGHAUSEN, K., FASSBINDER, J.W.E. & IRLINGER, W.E. [2006]: Geophysikalische Prospektion in der keltischen Viereckschanze von Teufstetten, Gemeinde Wörth, Lkr. Erding, Oberbayern. Arch. Jahr Bayern 2005, 63 ff.
- BITTEL, K., KIMMIG, W. UND SCHIEK, S. [1981]: Die Kelten in Baden-Württemberg. Stuttgart
- BITTEL, K., SCHIEK, S. UND MÜLLER, D. [1990]: Die keltischen Viereckschanzen. Atlas arch. Geländedenkmäler in Baden-Württemberg 1, Stuttgart 1990

- BLOEMENDAL, J., KING, J. W., HUNT, A., DEMENOCAL, P. B. & A. HAYASHIDA, A. [1993]: Origin of the sedimentary magnetic record at Ocean Drilling Program sites on the Owen Ridge, western Arabian Sea, *Journal of Geophysical Research*, 98, 4199–4219
- BLOOM, A. L. [1960]: Optical Pumping, *Scientific American*, October 1960, 2-10
- BOFINGER, J. & HESSE, R. [2011]: Neue Wege der archäologischen Prospektion aus der Luft. Mit Airborne-Laserscanning Bodendenkmalen auf der Spur. In: *Denkmalpflege in Baden-Württemberg. Nachrichtenblatt der Landesdenkmalpflege* 1/2011, 40. Jahrgang, Esslingen
- BOLLACHER, C. [2009]: Die keltische Viereckschanze auf der „Klinge“ bei Riedlingen, Theiss Verlag Stuttgart
- BOYKO, T., SCHOLGER, R., STANJEK, H. & MAGPROX-TEAM [2004]: Topsoil magnetic susceptibility mapping as a tool for pollution monitoring: repeatability of in-situ measurements. *J. Applied Geophysics*, 55 (3-4): 249-259, Elsevier.
- BRAASCH, O. [1983]: Neue Viereckschanzen in und um München. *Arch. Jahr* 1982, 87 ff.
- BRAASCH, O. [1984]: Luftbildarchäologie um Landau und Dingolfing. *Hist. Heimatbl. Landau* 20, 60 f. Nr. 4
- BRAASCH, O. [1986]: Schneemerkmale im Deggendorfer Land – Bemerkungen zur Luftbildarchäologie, aus: ENGELHARDT, B. UND SCHMOTZ, K. (Hrsg.), *Vorträge des 4. Niederbay. Archäologentages 1986*, 131 ff.
- BVGB [1956]: Bayer. Vorgeschichtsbl. 21, 245
- BVGB [1991]: Bayer. Vorgeschichtsbl. Beih. 4, 195
- BVGB [1992]: Bayer. Vorgeschichtsbl. Beih. 5, 19
- BVGB [1993]: Bayer. Vorgeschichtsbl. Beih. 6, 100
- BVGB [1994]: Bayer. Vorgeschichtsbl. Beih. 7, 141
- BVGB [1995]: Bayer. Vorgeschichtsbl. Beih. 8, 138f.
- BVGB [1997]: Bayer. Vorgeschichtsbl. Beih. 10, 142
- BVGB [1999]: Bayer. Vorgeschichtsbl. Beih. 12, 121
- BVGB [2000]: Bayer. Vorgeschichtsbl. Beih. 13, 107.
- BVGB [2001]: Bayer. Vorgeschichtsbl. Beih. 14, 105.
- BVGB [2004]: Bayer. Vorgeschichtsbl. Beih. 16, 54
- BVGB [2005]: Bayer. Vorgeschichtsbl. Beih. 17, 15
- BVGB [2006]: Bayer. Vorgeschichtsbl. Beih. 18, 50
- CHRISTLEIN, R. & BRAASCH, O. [1982]: *Das unterirdische Bayern*. Stuttgart
- CLARK, A. [1990]: *Seeing Beneath the Soil. Prospecting Methods in Archaeology*, Butler & Tanner, London, ISBN: 0-7134-7994-9
- CORNELL, R.M. & SCHWERTMANN, U. [2003], *The Iron Oxides*, Wiley-VCH GmbH & Co. KgaA, Weinheim.
- DAY, R., M. FULLER, AND V.A. SCHMIDT [1977], Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence, *Phys. Earth Planet. Int.* 13, 260-267.
- DEARING, J.A., HAY, K. L., BABAN, S. M. J., HUDDLESTON, A. S., WELLINGTON, E. M. H. &

- LOVELAND, P. J. [1996]: Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conflicting theories using a national data set. *Geophysical Journal International*, 127, 728-734
- DE BOER, C. B. & DEKKERS, M. J. [1998]: Thermomagnetic behaviour of haematite and goethite as a function of grain size in various non-saturating magnetic fields. *Geophys. J. Int.* 133, 541-552
- DEKKERS, M. J. [1990]: Magnetic properties of natural goethite – III. Magnetic behavior and properties of minerals originating from goethite dehydration during thermal demagnetization. *Geophys. J. Int.* 103, 233-250.
- DUNLOP, D. J., & ÖZDEMİR, Ö. [1997]: *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*, Cambridge University Press, Cambridge UK, ISBN: 0-521-32514-5
- DUNLOP, D.J. [2002]: Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc). 2: Application to data for rocks, sediments and soils, *J. Geophys. Res.* **107**, B3, DOI: 10.1029/2001JB000487.
- EDER-HINTERLEITNER, A., NEUBAUER, W. & MELICHAR, P. [1999]: Magnetic Modelling for the 3D Reconstruction of the Neolithic Circular Ditch System of Steinabrunn/Austria. In: FASSBINDER, J. W. E. & IRLINGER, W. E. (EDS.) [1999]: *Archaeological Prospection. Third International Conference on Archaeological Prospection, Munich 9.-11. September 1999. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Band 108, München.*
- EGLI, R. [2003]: Analysis of the field dependence of remanent magnetization curves. *Journ. Geophys. Res.*, 108 (B2)
- EVANS, M. E. & HELLER, F. [2003]: *Environmental Magnetism – Principles and Applications of Enviromagnetism*, Academic Press, Elsevier Science, San Diego, ISBN: 0-12-243851-5
- FAßBINDER, J. [1994]: *Die magnetischen Eigenschaften und die Genese ferrimagnetischer Minerale in Böden im Hinblick auf die magnetische Prospektion archäologischer Bodendenkmäler.* Verlag Marie L. Leidorf, Buch am Erlbach
- FAßBINDER, J. [2004]: *Prospektionsmethoden in der Bayerischen Bodendenkmalpflege – Magnetometrie.* Aus: SCHMOTZ, K. (Hrsg.), *Vorträge des 22. Niederbay. Archäologentages 2004*, 319 ff., Rahden / Westfalen.
- FAßBINDER, J. [2005]: *Methodische Untersuchung zur Magnetometerprospektion von Viereckschanzen.* In: Neumann-Eisele, P. (Hrsg.): *Viereckschanzen. Rätselhafte Bauwerke der Kelten. Stand der Viereckschanzenforschung in Bayern und Baden-Württemberg. Kelheimer Museumshefte* 8
- FASSBINDER, J.W.E. [2009]: *Geophysikalische Prospektionsmethoden - Chancen für das archäologische Erbe*, in: *Tocare - Non Tocare, ICOMOS, Hefte des Deutschen Nationalkomitees*, vol. 47, edited by E. Emmerling, pp. 10-32, Siegl, München, ISBN: 978-3-935643-46-7.
- FASSBINDER, J.W.E. [2011]: *Geophysical prospection: A powerful non-destructive research method for the detection, mapping and preservation of monuments and sites.* *Ceur*, 806, B1-B9, ISSN 1613-00 73.
- FAßBINDER, J. & IRLINGER, W. [1996]: *Luftbild und magnetische Prospektion zur Erforschung einer keltischen Viereckschanze bei Oberframming.* *Arch. Jahr Bayern* 1995, 93 ff.
- FAßBINDER, J. W. E & IRLINGER, W. (EDS.) [1999A]: *Archaeological Prospection. Third International Conference on Archaeological Prospection, Munich 9.-11. September*

1999. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Band 108, München.
- FABßBINDER, J. & IRLINGER, W. [1999B]: Combining magnetometry and archaeological interpretation: a square enclosure in Bavaria. In: Archaeological Prospection. Third International Conference on Archaeological Prospection, Munich 9.-11. September 1999. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Band 108, München.
- FABßBINDER, J. & IRLINGER, W. [1999c]: Ein Erdwerk unbekannter Zeitstellung bei Riekofen und die spätkeltische Viereckschanze bei Unterhaimbuch. Beitr. Arch. Oberpfalz 3, 1999, 41 ff.
- FABßBINDER, J. & IRLINGER, W. [2000]: Magnetometerprospektion der spätkeltischen Viereckschanze von Maxing. Arch. Jahr Bayern 1999, 43 ff.
- FABßBINDER, J. & IRLINGER, W. [2005]: Magnetometerprospektion einer spätkeltischen Viereckschanze bei Pfeffenhausen. Aus: Arch. Jahr Bayern 2004, 76-78
- FASSBINDER, J.W.E. & STANJEK, H. [1993]: Occurrence of bacterial magnetite in soils from archaeological sites. Archeologia Polona, 31, 117-128.
- FABßBINDER, J. W. E., STANJEK, H. UND VALI, H. [1990]: Occurrence of magnetic bacteria in soil. Nature 343, 161 ff.
- FABßBINDER, J.W.E., UND GORKA, T. [2007]: Neue Methoden der Magnetometerprospektion für die Archäologie: Das Horizontalgradiometer, Arch. Jahr Bayern 2006, 183-185.
- FABßBINDER, J., BERGHAUSEN, K., GORKA, T., KÜHNE, L., DELLER, T., LINK, T. UND OBST, R. [2009]: Geophysikalische Prospektion im castellum Karloburg. Arch. Jahr Bayern 2008, 115-117.
- FLEISCHMANN, G., SCHULTHEIß, G., JOOS, R. [1987]: Bergwerksysteme in und um Laibstadt. In: Heimatkundliche Streifzüge, Schriftenreihe des Landkreises Roth, Heft 6, Regent-Verlag B. u. A. Eckert oHG, Heideck
- FÖRSTER, F. [1955]: Ein Verfahren zur Messung von magnetischen Gleichfeldern und Gleichfelddifferenzen und seine Anwendung in der Metallforschung und Technik. Zeitschrift für Metallkunde 46, Heft 5. Stuttgart
- FRIES-KNOBLACH, J. [2007]: Von Schwellbalken und Telegraphenmasten. Überlegungen zur Gründungsweise und Lebensdauer eisenzeitlicher Holzgebäude. Leipziger online-Beiträge zur Ur- und Frühgeschichtlichen Archäologie, 24. Professur für Ur- und Frühgeschichte der Universität Leipzig, www.uni-leipzig.de. ISSN 1612-4227
- GERSTNER, W. [1996]: Archäologie und Landwirtschaft. In: BECKER, H. (Hrsg.): Archäologische Prospektion, Luftbildarchäologie und Geophysik. Arbeitshefte des Bayer. Landesamtes für Denkmalpflege 59. München
- HAFFNER, A. (Hrsg.) [1995]: Heiligtümer und Opferkulte der Kelten. Sonderheft Archäologie in Deutschland. Theiss Verlag Stuttgart
- HALSALL, C. J., MAHER, B. A., KARLOUKOVSKI, V. V., SHAH, P. & WATKINS, S. J. [2008]: A novel approach to investigating indoor/outdoor pollution links : combined magnetic and PAH measurements. In : Atmospheric Environment. 42, 39, p. 8902-8909 8 p.
- HANESCH, M., MAIER, G. & SCHOLGER, R. [2003]: Mapping of heavy metal distribution by measuring the magnetic susceptibility of soils, J. Geophys. IV **107**, 605-608.
- HANESCH, M. & SCHOLGER, R. [2002]: Mapping of heavy metal loadings in soils by means of

- magnetic susceptibility measurements. *Environmental Geology*, 42, 857-870, Springer.
- HANESCH, M. & SCHOLGER, R. [2005]: The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. *Geophys. Journal Int.* Vol. 161 Issue 1, 50-56
- HANESCH, M., STANJEK, H. & PETERSEN, N. [2006]: Thermomagnetic measurements of soil iron minerals: the role of organic carbon. *Geophys. Journ. Int.* 165, 53-61
- HELLER, F., LIU, X., LIU, T. & XZ, T. [1991]: Magnetic susceptibility of loess in China. *Earth and Planetary Science Letters*, 103, 301-310
- HEMETSBERGER, S., & SCHOLGER, R. [2006]: Umweltmagnetik im Raum Trofaiach bis Eisenerz (steirische Eisenstrasse). *Mitt. Naturwiss. Ver. Steiermark* 135, 13-24. Graz
- HOFFMANN, A. [2007]: Untersuchungen zur prähistorischen Relief- und Bodengenese im Areal der spätlatènezeitlichen Viereckschanzen von Sallach, Lkr. Straubing-Bogen. *Regensburger Beiträge zur Bodenkunde, Landschaftsökologie und Quartärforschung*, Band 13, Universitätsverlag Regensburg
- HOFFMANN, A., KRAUSE, H., MÜLLER, S. UND VÖLKEL, J. [2006]: Ein Beitrag zur spätlatènezeitlichen Hausbauweise aus der Kleinen Viereckschanze in Sallach. *Arch. Jahr Bayern* 2005, Stuttgart
- HOFFMANN, V., KNAB, M., & APPEL, E. [1999]: Magnetic susceptibility mapping of roadside pollution, *J. Geochem. Explor.* 66, 313-326.
- IRLINGER, W. [1996a]: Ergänzungen durch 15 Jahre Luftbildarchäologie zur Identifizierung und Verbreitung der spätkeltischen Viereckschanzen in Niederbayern und der südlichen Oberpfalz. Aus: SCHMOTZ, K. (Hrsg.), *Vorträge des 14. Niederbay. Archäologentages* 1996, 55 ff.
- IRLINGER, W. [1996b]: Kommentierter Katalog zu den Luftbildfundstellen keltischer Viereckschanzen in und um München. In: BECKER, H. (Hrsg.): *Archäologische Prospektion, Luftbildarchäologie und Geophysik. Arbeitshefte des Bayer. Landesamtes für Denkmalpflege* 59. München
- IRLINGER, W. [1996c]: Die keltischen Viereckschanzen – Erkennungsmöglichkeiten verebneter Anlagen im Luftbild. In: BECKER, H. (Hrsg.): *Archäologische Prospektion, Luftbildarchäologie und Geophysik. Arbeitshefte des Bayer. Landesamtes für Denkmalpflege* 59. München
- IRLINGER, W. [2004]: Prospektionsmethoden in der Bayerischen Bodendenkmalpflege – Luftbildarchäologie. Aus: SCHMOTZ, K. (Hrsg.), *Vorträge des 22. Niederbay. Archäologentages* 2004, 295 ff., Rahden / Westfalen.
- IRLINGER, W. [2005]: Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick. In: NEUMANN-EISELE, P. (HRSG.) [2005]: *Viereckschanzen, Rätselhafte Bauwerke der Kelten. Archäologisches Museum der Stadt Kelheim, Museumsheft* 8
- IRLINGER, W. & KREINER, L. [1998]: Entdeckt, veröffentlicht – zerstört. *AID* 1, 36.
- ISHIKAWA, Y. [1962]: Magnetic properties of the ilmenite-haematite system at low temperatures. *Journ. Phys. Soc. Jp.* 17, 1835-1844
- JELEŃSKA, M., A. HASSO-AGOPSOWICZ, B. KOPCEWICZ, A. SUKHORADA, K. TYAMINA, M. KĄDZIAŁKO-HOFMOKL & Z. MATVIISHINA [2004]: Magnetic properties of the profiles of polluted and non-polluted soils. A case study from Ukraine, *Geophys. J. Int.* 159, 104-116.

- JELEŃSKA, M., A. HASO-AGOPSOWICZ, M. KĄDZIAŁKO-HOFMOKL, B. KOPCEWICZ, A. SUKHORADA, K. BONDAR, AND Z. MATVIISHINA [2008]: Magnetic Structures of Polluted Soil Profiles from Eastern Ukraine. Acta Geophysica, Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences
- JILES, D. [1998]: Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, Taylor & Francis Group, Boca Raton
- JORDANOVA, N., PETROVSKÝ, E., KOVACHEVA, M. & JORDANOVA, D. [2001]: Factors determining magnetic enhancement of burnt clay from archaeological sites. Jour. Arch. Sci. 28, 1137 ff.
- KAINDL, M. [2010]: Die jüngerlatènezeitliche Großsiedlung von Steinebach a. Wörthsee im Landkreis Starnberg. Bericht der Bayerischen Bodendenkmalpflege 51, 127 ff.
- KELLER, E. [1977]: Bodendenkmäler in Bayern, München
- KERSCHER, H. [2008]: Beobachtungen am Limes-Wachtposten 14/77 auf dem Pfahlbuck bei Kipfenberg. Arch. Jahr Bayern 2007, 77 f.
- KLEIN, F. [1991]: Erste Untersuchungen in einer Viereckschanze bei Riedlingen, Kreis Biberach. Arch. Ausgr. Bad.-Württ. 1991, 111 ff.
- KLEIN, F. [1995]: Archäologie im Baugebiet „Klinge“ bei Riedlingen, Kreis Biberach, Arch. Ausgr. Bad.-Württ. 1995, 126 ff.
- KLEIN, F. [1996]: Zur Viereckschanze „Klinge“ bei Riedlingen, Kreis Biberach, Baden-Württemberg. Aus: SCHMOTZ, K. (Hrsg.), Vorträge des 14. Niederbay. Archäologentages 1996, 155 ff
- KRAUSE, H. [2008]: Die spätkeltische Viereckschanze von Papferding, Lkr. Erding. Magisterarbeit. Regensburger Beiträge zur prähistorischen Archäologie, Bd. 17, Universitätsverlag Regensburg
- KRAUSE, R. UND WIELAND, G. [1993]: Eine keltische Viereckschanze bei Bopfingen am Westrand des Rieses. Ein Vorbericht zu den Ausgrabungen und zur Interpretation der Anlage. Germania 71, 59 ff.
- KRAUSE, H., FAßBINDER, J.W. E. UND LINCK, R. [2012]: Zerstörungsfrei und hochauflösend: Prospektion in der Viereckschanze von Itzling. Arch. Jahr Bayern 2011, 68 ff.
- KUKLA, G., HELLER, F., LIU, X. M., XU, T. C., LIU, T. S. & AN, Z. S. [1988]: Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility. Geology, 16, 811-814
- LE BORGNE, E. [1955]: Susceptibilité magnétique anormale du sol superficiel, Ann. Geophys., 11, 399-419
- LE BORGNE, E. [1960]: Influence du feu sur les propriétés magnétiques du sol et sur celles du chiste et du granite, Ann. Geophys. 16, 159-195
- LEIDORF [1996]: Luftbildarchäologie – Geschichte und Methode. Aus: BECKER, H. (Hrsg.): Archäologische Prospektion, Luftbildarchäologie und Geophysik. Arbeitshefte des Bayer. Landesamtes für Denkmalpflege 59. München
- LEIDORF, K. [1999]: Zwei neuentdeckte Viereckschanzen in Südbayern. Arch. Jahr Bayern 1998, 66 ff.
- LEIDORF, K. [2008]: Der Blickwinkel entscheidet. Arch. Jahr Bayern 2007, 157-159

- LEOPOLD, M. [2003]: Multivariate Analyse von Geoarchiven zur Rekonstruktion eisenzeitlicher Landnutzung im Umfeld der spälatenezeitlichen Viereckschanze von Poign, Lkr. Regensburg. www.opus-bayern.de/uni-regensburg/volltexte/2003/233
- LOVLEY, D. R., J. F. STOLZ, E. J. P. PHILLIPS, AND G. L. NORD [1987]: Anaerobic production of magnetite by a dissimilatory iron-reducing microorganism, *Nature*, 330, 252-254
- LOWRIE, W. & FULLER, M. [1971]: On the alternating field demagnetization characteristics of multidomain thermoremanent magnetization in magnetite. *Journ. Geophys. Res.* 76, 6339-6349
- MAHER, B.A. [1986]: Characterisation of soil by mineral magnetic measurements, *Phys. Earth Planet. Int.* 42, 76-92.
- MAHER, B. A., ALEKSEEV, A., & ALEKSEEVA, T. [2003]: Magnetic mineralogy of soils across the Russian Steppe: Climatic dependence of pedogenic magnetite formation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 201, 321-341
- MAHER, B. A., MOORE, C. & MATZKA, J. [2008]: Spatial variation in vehicle-derived metal pollution identified by magnetic and elemental analysis of roadside tree leaves. In : *Atmospheric Environment*. 42, 2, p. 364-373 10 p.
- MAHER, B. A. & TAYLOR, R. M. [1989]: Origin of soil magnetite, *Nature* 340, 106
- MAHER, B.A. & THOMPSON, R. [1991]: Mineral magnetic record of the Chinese loess and paleosols. *Geology*, 19, 3-6
- MÜLLER, S. [2008]: Die Viereckschanzen von Sallach, Gde. Geiselhöring, Lkr. Straubing-Bogen, Niederbayern, im Spiegel keltischer Besiedlung des Kleinen Labertales. *Regensburger Beiträge zur prähistorischen Archäologie*, Band 18, Universitätsverlag Regensburg
- MULLINS, C. E. [1974]: The magnetic properties of the soil and their application to archaeological prospecting, *Archaeo-Physika* 5
- MULLINS, C. E. [1977]: Magnetic susceptibility of soils and its significance in soil science – a review, *J. Soil Sci.*, 28, 223-246
- NETH, A. [2005]: Die beiden Viereckschanzen von Nordheim: Gutshöfe des keltischen Landadels. In: Neumann-Eisele, P. (Hrsg.): *Viereckschanzen. Rätselhafte Bauwerke der Kelten. Stand der Viereckschanzenforschung in Bayern und Baden-Württemberg*. Kelheimer Museumshefte 8
- NEUBAUER, W., EDER-HINTERLEITNER, A., DONEUS, M. & MELICHAR, P. [1999]: Archaeological Prospection of the Middle Neolithic site Puch/Kleedorf, Lower Austria. In: FABBINDER, J. W. E. & IRLINGER, W. E. (EDS.) [1999]: *Archaeological Prospection. Third International Conference on Archaeological Prospection, Munich 9.-11. September 1999*. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Band 108, München.
- OCHES, E.A., & BANERJEE, S. K. [1996]: Rock magnetic proxies of climate change from loess-paleosol sediments of the Czech Republic. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 40, 287-300
- PETERMANN, H., & BLEIL, U. [1993]: Detection of live magnetotactic bacteria in South Atlantic deep- sea sediments, *Earth & Planetary Science Letters*, 117, 223-228
- PETERSEN, N., VON DOBENECK, T., AND VALI, A. [1986]: Fossil bacterial magnetite in deep-sea sediments from the South Atlantic Ocean, *Nature*, 320, 611-615

- PÉTRONILLE, M. [2009]: Contribution à la caractérisation du type des sols à partir des propriétés magnétiques. Thèse de Doctorat de l'Institut de Physique du Globe de Paris
- PLANCK, D. [1982]: Eine keltische Viereckschanze in Fellbach-Schmidlen, Rems-Murr-Kreis. *Germania* 60, 106 ff.
- REICHENBERGER, A. [1994]: Keltische Heiligtümer in Süddeutschland. Zum Stand der Viereckschanzenforschung. Aus: SCHMOTZ, K. (Hrsg.), Vorträge des 12. Niederbay. Archäologentages 1994, 169 ff.
- REICHENBERGER, A. UND SCHAICH, M. [1995]: Ausgrabungen in der spätkeltischen Viereckschanze bei Pankofen. *Arch. Jahr Bayern* 1994, 90 ff.
- REICHENBERGER, A. UND SCHAICH, M. [1996]: Vorbericht zur Ausgrabung der Viereckschanze von Plattling-Pankofen, Lkr. Deggendorf. Aus: SCHMOTZ, K. (Hrsg.), Vorträge des 14. Niederbay. Archäologentages 1996, 83 ff.
- REINECKE, P. [1921-22]: Die spätkeltischen Viereckschanzen in Süddeutschland. *Bayerischer Vorgeschichtsfreund* 1-2, 39 ff.
- ROBINSON, S. G. [1986]: The late Pleistocene paleoclimatic record of North Atlantic deep-sea sediments revealed by mineral-magnetic measurements. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 42, 22-47
- RGZM [1971]: Führer zu vor- und frühgeschichtlichen Denkmälern 18, Mainz am Rhein
- SCHAICH, M. [1995]: Schanze mit Umgangsbau und drei Brunnen. *Arch. In Deutschland* 4, 22 ff.
- SCHAICH, M. [1998]: Zur Ausgrabung der Viereckschanze von Pocking-Hartkirchen, Lkr. Passau. Aus: SCHMOTZ, K. (Hrsg.), Vorträge des 16. Niederbay. Archäologentages, 157 ff.
- SCHAICH, M. [2002]: Niederbayerische Viereckschanzen, Fortschritte der Forschung. Aus: SCHMOTZ, K. (Hrsg.), Vorträge des 20. Niederbay. Archäologentages, 331 ff.
- SCHAICH, M. UND WATZLAWIK, S. [1997]: Die spätlatènezeitliche Viereckschanze von Hartkirchen, Stadt Pocking, Landkreis Passau, Niederbayern. *Arch. Jahr Bayern* 1996, S. 104 ff.
- SCHAEFFER / SCHACHTSCHABEL [2010]: Lehrbuch der Bodenkunde, 16. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- SCHLEIFER, NORBERT [1998]: Gesteinsmagnetische und pedologische Ursachen magnetischer Anomalien in der archäologischen Prospektion. Diplomarbeit am Institut für Allgemeine und Angewandte Geophysik der Ludwig-Maximilians-Universität München, November 1998.
- SCHLEIFER, N., FASSBINDER, J. W. E., IRLINGER, W. E. & STANJEK, H. [2003]: Investigation of an eneolithic chamber-group ditchsystem near riekofen (Bavaria) with archaeological, geophysical and pedological methods. In: *Soils and Archaeology, Papers of the 1st International Conference on Soils and Archaeology, Szazhalombatta, Hungary, 30 May - 3 June 2001, BAR Int. Series 1163:59-63*
- SCHMOTZ, K. [1998]: Siedlungsarchäologie in der Gemeinde Buchhofen, Lkr. Deggendorf. Aus: SCHMOTZ, K. (Hrsg.), Vorträge des 16. Niederbay. Archäologentages 1998, 51 ff
- SCHMOTZ, K. [2002]: Eine neue spätkeltische Viereckschanze bei Fehmbach, Gde. Stephansposching, Lkr. Deggendorf. Aus: SCHMOTZ, K. (Hrsg.), Vorträge des 20. Niederbay. Archäologentages 2002, 35 ff.

- SCHROEDER, D., UND BLUM, W. E. H. [1992]: Bodenkunde in Stichworten. Hirts Stichwortbücher, Verlag Gebrüder Borntraeger, Stuttgart.
- SCHUBMANN, M. [2008]: Die Latènezeit im südlichen Mittelfranken. Universitätsforsch. Prähist. Arch. 161, 2 Bde., Bonn.
- SCHWARZ, K. [1959]: Atlas der spätkeltischen Viereckschanzen Bayerns, München
- SCHWARZ, K. [1960]: Spätkeltische Viereckschanzen. Ergebnisse der topographischen Vermessung und der Ausgrabungen 1957-1959, 7ff. In: Jahresbericht der Bay. Bodendenkmalpflege, Selbstverlag des Bay. Landesamtes für Denkmalpflege, München
- SCHWARZ, K. [1975]: Die Geschichte eines keltischen Temenos im nördlichen Alpenvorland. In: Ausgrabungen in Deutschland. RGZM Monogr. 1, 1; 324 ff. Mainz
- SCHWARZ, K. [2007]: Atlas der spätkeltischen Viereckschanzen Bayerns, Textband. Verlag C. H. Beck München
- SCHWARZ, K., & WIELAND, G. [2005]: Die Ausgrabung in der Viereckschanze 2 von Holzhausen. Rahden/Westfalen
- SCOLLAR, I. [1970]: Magnetic Methods of Archaeological Prospecting – Advances in Instrumentation and Evaluation Techniques, Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A. 269, 109-119
- SCOLLAR, I. [1975]: Wissenschaftliche Methoden bei der Prospektion archäologischer Fundstätten. In: Ausgrabungen in Deutschland, Monogr. RGZM 3, Mainz 1975, 158 ff.
- SCOLLAR ET AL. [1990]: Scollar, I., A. Tabbagh, A. Hesse, I. Herzog, Archaeological Prospecting and Remote Sensing, in Topics in Remote Sensing, 2, edited by G. Hunt and M. Rycroft, Cambridge University Press, Cambridge UK, ISBN: 0-521-32050-X
- SINGER, M. J., VEROSUB, K. L. & FINE, P. [1996]: A conceptual model for the enhancement of magnetic susceptibility in soils. Quaternary International, 34-36, 243-248
- SNOWBALL, I. [1993]: Mineral magnetic properties of Holocene lake sediments and soils from the Kårsa valley, Lapland, Sweden, and their relevance to palaeoenvironmental reconstruction, Terra Nova, 5 (3), 258-270
- SOFFEL, H. [1991]: Paläomagnetismus und Archäomagnetismus, Springer Verlag, Berlin
- STAHR, K., KANDELER, E., HERRMANN, L. UND STRECK, T. [2008]: Bodenkunde und Standortlehre, Grundwissen Bachelor, UTB 2967. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- TAUXE, L. WITH CONTRIBUTIONS FROM: BUTLER, R., BANERJEE, S. & VAN DER VOO, R. [2009]: Essentials of Paleomagnetism, University of California Press. Web Edition: <http://magician.ucsd.edu/Essentials/>
- TELFORD, W. M., GELDART, L. P. & SHERIFF, R. E. [1990]: Applied Geophysics, Second Edition, Cambridge University Press
- THOMPSON, R., & OLDFIELD, F. [1986]: Environmental Magnetism, Allen & Unwin, London, ISBN: 0-04-538003-1
- TITE, M.S., & C. E. MULLINS [1971]: Enhancement of the magnetic susceptibility of soils on archaeological sites. Archaeometry, 13, 209-220
- VÖLKEL, J., LEOPOLD, M. & WEBER, B. [2002]: Neue Befunde zur Landschaftsentwicklung im niederbayerischen Donaauraum während der Zeitenwende (keltisches Oppidum von Manching / Viereckschanze von Poign bei Bad Abbach). – Zeitschrift für Geomorphologie. Neue Folge, Supplementband, 128: 47-66

- VON DER OSTEN-WOLDENBURG, H. [2002]: Eine keltische Doppelschanze bei Osterholz, Gde. Kirchheim am Ries, Ostalbkreis. Arch. Ausgrabungen in Baden-Württemberg 2001, 79. Stuttgart
- VON DER OSTEN-WOLDENBURG, H., WIELAND, G., & WAHL, J. [1999]: Untersuchungen in der spätkeltischen Viereckschanze „Am Scheerer Weg“ bei Mengen-Ennetach, Kreis Sigmaringen. Arch. Ausgrabungen in Baden-Württemberg, 125-133. Stuttgart
- WEBER, F. [1909/10]: Bauwerke zu Befestigungs- und Schutzzwecken in Oberbayern aus mittelalterlicher, römischer und vorrömischer Zeit. Altbay. Monatsschr. 9, 117
- WENDLING, H. [2009]: Geophysikalische Prospektion im Oppidum von Manching. Arch. Jahr Bayern 2008, 55-57
- WIELAND, G. (Hrsg.) [1999]: Keltische Viereckschanzen. Einem Rätsel auf der Spur. Theiss Verlag Stuttgart
- WINGHART, S. [1996]: Luftbild und Geophysik in der archäologischen Denkmalpflege. In: Archäologische Prospektion. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege Band 59, pp. 29-32, München
- WISCHENBARTH, P. [1996]: Irdene Tierminiaturen aus den Fluren des Landkreises Neu-Ulm - Zeugen vergangener Kindheit. Geschichte im Landkreis Neu-Ulm 2, 31-50.
- ZH INSTRUMENTS [2008]: User's Manual Magnetic susceptibility meter SM-30, Publications date: April 2008, Brno, Czech Republic, www.zhstruments.cz
- 900 JAHRE LAIBSTADT 1080 - 1980 [1980]. Herausgeber: Heimat- und Verschönerungsverein Laibstadt; Stadt Heideck; Katholische Landjugendbewegung Laibstadt.

Physikalische Einheiten

Größe	Zeichen	Einheit [SI]	Einheit [cgs]
Magnetische Feldstärke	H	A/m (Ampere/Meter)	Oe (Oersted)
Magnetische Induktion / mag. Flussdichte	B	T (Tesla)	G (Gauß)
Magnetisierung	M	A/m (Ampere/Meter)	emu/cm ³
Magnetisches Moment	m	Am ²	emu
Mag. Moment pro Gewicht		Am ² /kg	emu/g
Suszeptibilität	κ	dimensionslos	dimensionslos
Massensuszeptibilität		m ³ /kg	emu Oe ⁻¹ g ⁻¹

Umrechnungsformeln zwischen cgs- und SI-Einheiten

Größe	Umrechnung cgs → SI	Umrechnung SI → cgs
Magnetische Feldstärke	$1 \text{ Oe} = 10^3 / 4 \pi \text{ A/m}$ $\text{Oe} = 79,58 \text{ A/m}$	$1 \text{ A/m} = 4 \pi \cdot 10^{-3} \text{ Oe}$ $1 \text{ A/m} = 12,57 \cdot 10^{-3} \text{ Oe}$
Magnetische Induktion / mag. Flussdichte	$1 \text{ T} = 1 \text{ Vs/m}^2 = 10^4 \text{ G}$	$1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$
Magnetisierung	$1 \text{ emu/cm}^3 = 10^3 \text{ A/m}$	$1 \text{ A/m} = 10^{-3} \text{ emu/cm}^3$
Magnetisches Moment	$1 \text{ emu} = 0,001 \text{ Am}^2$	$1 \text{ Am}^2 = 1000 \text{ emu}$
Mag. Moment pro Gewicht	$1 \text{ emu/g} = 1 \text{ Am}^2/\text{kg}$	$1 \text{ Am}^2/\text{kg} = 1 \text{ emu/g}$
Suszeptibilität	$\kappa_{\text{cgs}} = 1/4\pi \cdot \kappa_{\text{SI}}$	$\kappa_{\text{SI}} = 4\pi \cdot \kappa_{\text{cgs}}$
Massensuszeptibilität	$1 \text{ emu Oe}^{-1} \text{ g}^{-1} = 10^3/4\pi \text{ m}^3/\text{kg}$	$1 \text{ m}^3/\text{kg} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ emu Oe}^{-1} \text{ g}^{-1}$

Anhang 1. Messverfahren, Messgeräte und Software

A1.1. Magnetometerprospektionen

Die Magnetometerprospektionen wurden durchgeführt mit Cäsium-Magnetometern (TELFORD ET AL. [1990]).

Die beiden verwendeten Magnetometertypen sind:

- Scintrex CS2 (Literatur z. B.: BECKER [1996F], FASSBINDER & IRLINGER [1999B])
- Scintrex Smartmag SM4G-Special (BECKER [1999]).

Die Empfindlichkeit der Geräte beträgt +/- 0,01 nT.

Die Messgittergröße beträgt 40 x 40 Meter bzw. 20 x 20 Meter.

Gemessen wurde in Duo-Sensor-Anordnung: Zwei parallele Sonden sind im Abstand von 50 cm auf dem Tragegestell montiert. Der Messreihenabstand von 1 Meter und die Messfrequenz von 10 Hz führten zu einer Auflösung von 50 x 10 cm, die bei der späteren Auswertung der Daten auf 25 x 25 cm interpoliert wurde.

Software zur Bearbeitung der Magnetometerprospektionen:

Hilfstoools, am BLfD programmiert:

- Bindump: Download der Daten vom Messgerät auf den PC
- Xfsmart: Umwandlung der Binärdaten in ASCII-Daten
- Splitx: Zerlegung der fortlaufenden ASCII-Daten in einzelne Messquadrate
- Resam2: Normierung der Daten

Professionelle Software:

- Geoplot: Rechnerische Verarbeitung der Magnetometerdaten, Filterungen
- Golden Software Surfer: Erstellung von Magnetogrammen mit Achsenbeschriftung, Legende etc.
- Adobe Photoshop: Überlagerung von Magnetogrammen mit Kartenmaterial
- AutoCad: Digitalisierung der Interpretation von Magnetogrammen und Planerstellung

A1.2. Suszeptibilitätsmessungen im Gelände

Die Messungen wurden durchgeführt mit einem Kappameter des Typs SM-30 der Firma ZH Instruments (ZH INSTRUMENTS [2008]).

Empfindlichkeit: $1 \cdot 10^{-7}$ SI Einheiten, Maximal möglicher Wert: 1 SI. Anzeige in 10^{-3} SI Einheiten. Frequenz 8 kHz, Messzeitraum 5 Sekunden, Spulengröße 50 mm Durchmesser.

Papferding:

- Messung senkrechter Profile im ehemaligen Wallbereich im Abstand von 10 cm zueinander, Punktabstand je 5 cm, siehe Kap. 5.4.1.;
- Flächenhafte Messung an Profilschnitt quer durch den ehemaligen Graben der Viereckschanze, Punktabstand 10 x 10 cm, siehe Kap. 5.4.2.

Fehmbach:

- Flächenhafte Messung an drei Querprofilen durch den ehemaligen Graben der Schanze, Punktabstand 20 x 20 cm, siehe Kap. 6.3.

A1.3. Labormessungen

A1.3.1. Verwendete Messgeräte

Kappabridge

Die Labormessungen der magnetischen Suszeptibilität der Laborproben wurden durchgeführt am Paläomagnetischen Labor der Ludwig-Maximilians-Universität München in Niederlippach.

Gerät: Kappabridge KLY-2, Geofyzika n. p. Brno, Czechoslovakia.

Magnetische Feldstärke: 300 A/m, Frequenz: 920 Hz

Minispin

An diesem Spinner-Magnetometer wurden die Suszeptibilitätsmessungen der Proben aus Laibstadt durchgeführt.

Kryogenmagnetometer

An Proben aus Papferding wurden die Messung der NRM sowie der Magnetisierung nach IRM-Aufprägung durchgeführt am Kryogenmagnetometer von 2-G Enterprises, Mt. View, Ca., in Niederlippach. Messgenauigkeit: 10^{-3} mA/m.

Wechselfeldentmagnetisierung

Die Entmagnetisierung von Proben aus Papferding wurde durchgeführt in Niederlippach an der Wechselfeldanlage von 2-G Enterprises, Mt. View, Ca. Sie erfolgte nacheinander in 3 Raumrichtungen mit jeweils 3 Sekunden pro Richtung mit einem Feld von 1500 Oe bzw. $120 \cdot 10^3$ A/m.

IRM-Aufprägung

Bei Proben aus Papferding wurde eine IRM aufgeprägt. Verwendetes Gerät: Pulse Magnetiser MMPM-9, Magnetic Measurements, in Niederlippach. Feldstärke: Minimal 8 mT (+/- 20%), maximal 2,3 T (+/- 10%). Pulsdauer 5-10 Millisekunden. Maximaler Fehler: 1% des angezeigten Feldwertes +/- 4 digits.

VFTB

Proben aus Papferding, Fehmbach und Laibstadt wurden an der VFTB (Variable Field Translation Balance) gemessen, die nach dem Prinzip der magnetischen Translationswaage arbeitet („The MM VFTB cookbook“, www.vftb.com).

Die Messungen der IRM, der Hysterese- und Backfeldkurven können direkt nacheinander durchgeführt werden; für die thermischen Messungen wurde jeweils frisches Probenmaterial derselben Probe verwendet.

Software für die Erstellung der Messkurven der Labormessungen

- Microsoft Excel: Erstellung von Diagrammen
- Microsoft Word: Erstellung von Texten

A.1.3.2. Einzelheiten der Labormessungen an Proben aus Papferding

Beprobung

Die Beprobung erfolgte zu Ende der Geländearbeiten, also Anfang November 2007.

Probenarten:

- Mit einem Messing-Ausstechzylinder des Durchmessers 2,5cm wurden Erdproben aus der Profilwand entnommen und sofort in Quarz-Probenbehälter mit Rauminhalt $8,55\text{cm}^3$ verfüllt. Diese Proben wurden luftdicht verpackt bei maximal 7°C gelagert und wenige Tage später für die Messung der Suszeptibilität, der NRM und der IRM herangezogen. Die Probengewichte (ohne Dose) lagen etwa zwischen 14 g und 17 g.
- Zudem wurde loses Probenmaterial entnommen und wegen dessen hohen Feuchtigkeitsgehaltes und Gefahr der Schimmelbildung mehrere Tage lang an der Luft getrocknet. Mit diesem Material erfolgten die Messungen an der VFTB.

Beprobungsstellen:

- Im Grabenbereich wurde die Grabenmitte senkrecht in Abständen von 10 cm mit dem Ausstechzylinder beprobt (siehe auch Abbildung 5.11.). Durch den gleichmäßigen Abstand der Proben erhielten wir hier 1-3 Proben je Schicht, je nach deren Mächtigkeit.
- Zusätzlich wurden im Graben- sowie im Wallbereich Probenmaterial aus „schichttypischen Stellen“ aller identifizierten Schichten entnommen, und zwar jeweils 2 Einzelproben mit dem Ausstechzylinder sowie zusätzlich loses Bodenmaterial; vgl. hierzu Tabelle 6.1.

Die Probenamen sind jeweils dreiteilig.

- 1. Position: Die Nummer des Profils. Dabei bezeichnet „P1“ für „Papferding1“ das östliche, „P2“ für „Papferding2“ das westliche Grabungsprofil. Wie im Text Kapitel 6.3. dargelegt wird, zeigt das westliche Profil 2 größeren Detailreichtum, unter anderem sind nur hier noch restliche Wallfragmente zu erkennen. Daher beschränkte sich die weitere Probenbearbeitung auf dieses Profil, und alle verarbeiteten Proben beginnen mit P2.
- 2. Position: Die Nummer der Bodenschicht, siehe Kapitel 6.3.
- 3. Position: Die Nummer der Einzelprobe:
 - Schichttypische Proben: Einzelproben Nr. 01 oder 02
 - Senkrechte Beprobung in Grabenmitte: Fortlaufende Nrn. 11-26, von der untersten zur obersten Probe gezählt

NRM und magnetische Suszeptibilität

Wenige Tage nach Probennahme wurden die Proben in den $8,55\text{cm}^3$ –Probendosen am Labor in Niederlippach gesteinsmagnetisch untersucht.

Die NRM wurde am Kryogenmagnetometer, die Suszeptibilität an der Kappabridge gemessen.

IRM

Die NRM der $8,55\text{cm}^3$ –Dosenproben wurde in der Wechselfeldentmagnetisierungsanlage in allen drei Raumrichtungen abmagnetisiert, danach wurde mit dem Pulse Magnetiser MMPM-9 eine IRM aufgeprägt. Maximales Feld: 2,3 Tesla.

VFTB: IRM, Backfield, Hysterese und thermische Messungen

Die ersten drei VFTB-Messungen (Proben: P2-01-v1, P2-19-v1 und P2-26-v1) wurden in Niederlippach gemessen, die folgenden Proben an den beiden VFTB-Geräten in München. Daher, und auch wegen der Erprobung der besten Parameter im Laufe der Messreihen, können sich die Einzelproben in ihren Messparametern teilweise unterscheiden.

Gemeinsam ist allen Proben:

- IRM, Backfield und Hysterese wurden unmittelbar nacheinander gemessen.
- Für die thermische Messung wurde frisches Probenmaterial verwendet. Die Probe wurde zunächst mit dem maximal möglichen Feld aufmagnetisiert. Während des Verlaufs von Erhitzung und Abkühlung war nur ein kleines Feld angelegt, um den paramagnetischen Einfluss möglichst gering zu halten.
 - o Feldstärke während der Messung: Üblicherweise etwa $24 \cdot 10^3$ A/m; Ausnahmen:
 - o P2-26-v1 ($80 \cdot 10^3$ A/m), aber Wiederholungsmessung P2-26-v2 mit $24 \cdot 10^3$ A/m
 - o P2-24-v1 ($333 \cdot 10^3$ A/m)
 - o P2-19-v1 ($80 \cdot 10^3$ A/m)
 - o P2-06-v1 ($333 \cdot 10^3$ A/m)
 - o P2-01-v1 ($80 \cdot 10^3$ A/m)
- Die Aufheiz- und Abkühlrate betrug 35 bis 40°C pro Minute.

A.1.3.3. Einzelheiten der Labormessungen an Proben aus Fehmbach

Beprobung

Aus den einzelnen Profilschichten des Profils C-D im Südgraben sowie des Profils E-F diagonal durch die Südostecke des Grabens wurden jeweils etwa 500 Gramm schichttypisches Material der Grabenfüllung (Erdmaterial und Gesteinsstücke bis etwa 3 cm Durchmesser) entnommen.

Zusätzlich wurde Bodenmaterial von einer deutlich erkennbaren Pfostenstellung („Pfosten 2“) entnommen. Diese Probe stammt aus einer Tiefe von etwa 15 cm unterhalb des Planums und enthält die Substanz eines mittlerweile völlig zersetzten Holzpfostens.

Für die weiteren Untersuchungen wurden das Erdmaterial zerkleinert, gesiebt und somit in die Fein-, Mittel- und Grobfraction unterteilt. Tabelle 6.7. beschreibt das Probenmaterial.

Das Material wurde in zylindrische Kunststoffdosen mit einem Rauminhalt von etwa 40 cm^3 abgefüllt (Innendurchmesser 32 mm, Höhe 50 mm). Wegen des stark inhomogenen Porenraums, insbesondere bei der Grobfraction, wurden die Messwerte nicht auf die Dichte, sondern auf die Masse des Probenmaterials normiert.

Suszeptibilitätsmessung

Die einzelnen Gesteinsproben (siehe Tab. 6.1.) wurden gewogen und direkt in den Probenbehälter der Kappabridge eingelegt. Das Erdmaterial wurde mit dem Kunststoffdosen in der Kappabridge gemessen.

VFTB: IRM, Backfield, Hysterese und thermische Messungen

Die Proben wurden an den beiden VFTB-Geräten in München gemessen. Daher können sich die Einzelproben in ihren Parametern teilweise unterscheiden.

Die Probengewichte lagen je nach verwendetem Probenhalter bei etwa 250 bis 530 mg.

Gemeinsam ist allen Proben:

- IRM, Backfield und Hysterese wurden unmittelbar nacheinander gemessen.
- Für die thermische Messung wurde frisches Probenmaterial verwendet. Die Probe wurde vor Beginn der Erhitzung mit einem starken Feld von etwa $300 \cdot 10^3$ A/m aufmagnetisiert.
- Während des Verlaufs von Erhitzung und Abkühlung war nur ein kleines Feld von etwa $25 \cdot 10^3$ A/m angelegt, um den paramagnetischen Einfluss möglichst gering zu halten.
- Die Aufheiz- und Abkühlrate betrug 35 bis 40°C pro Minute.

A.1.3.4. Einzelheiten der Labormessungen an Proben aus Laibstadt

Beprobung

An der Viereckschanze von Laibstadt konnte keine Grabung durchgeführt werden. Die Probennahme erfolgte daher in Form von Bodensondagen mit Hilfe eines Bohrhammers der Firma Atlas Copco. In der Nordwestecke der Viereckschanze wurden vier Bohrungen in einer linearen Flucht durchgeführt.

Je ein Bohrpunkt befand sich im Außenbereich der Schanze, im Graben, auf der heutigen Wallkrone sowie im Innenraum am Ort einer positiven magnetischen Anomalie.

Suszeptibilität

Die Messung der Suszeptibilität erfolgte im Labor in Niederlippach am Minispin mit Probengewichten zwischen 20 und 30 Gramm.

VFTB: IRM, Backfield, Hysterese und thermische Messungen

Die VFTB-Messungen wurden durchgeführt in München (Geräte im Untergeschoss und im 4. Stock). Die Probengewichte lagen zwischen 250 und 300 Milligramm.

- IRM erworben bei einem Feld bis zu etwa $400 \cdot 10^3$ A/m bzw. etwa $660 \cdot 10^3$ A/m. Zur Vergleichbarkeit aller Proben werden die IRM-Werte bei einem Feld von etwa $400 \cdot 10^3$ A/m (+/- 1%) angegeben.
- Backfieldmessungen zur Ermittlung des Remanenz-Koerzitivfeldes.
- Hysteresemessungen
- Erhitzung der Proben bis 700°C in einem konstanten Feld von 32 mT mit vorheriger Aufmagnetisierung bei 830 mT
- Die Aufheiz- und Abkühlrate betrug 35 bis 40°C pro Minute.

IRM-, Hysterese- und Backfieldmessungen wurden unmittelbar hintereinander durchgeführt. Für die thermische Behandlung wurde jeweils frisches Probenmaterial verwendet.

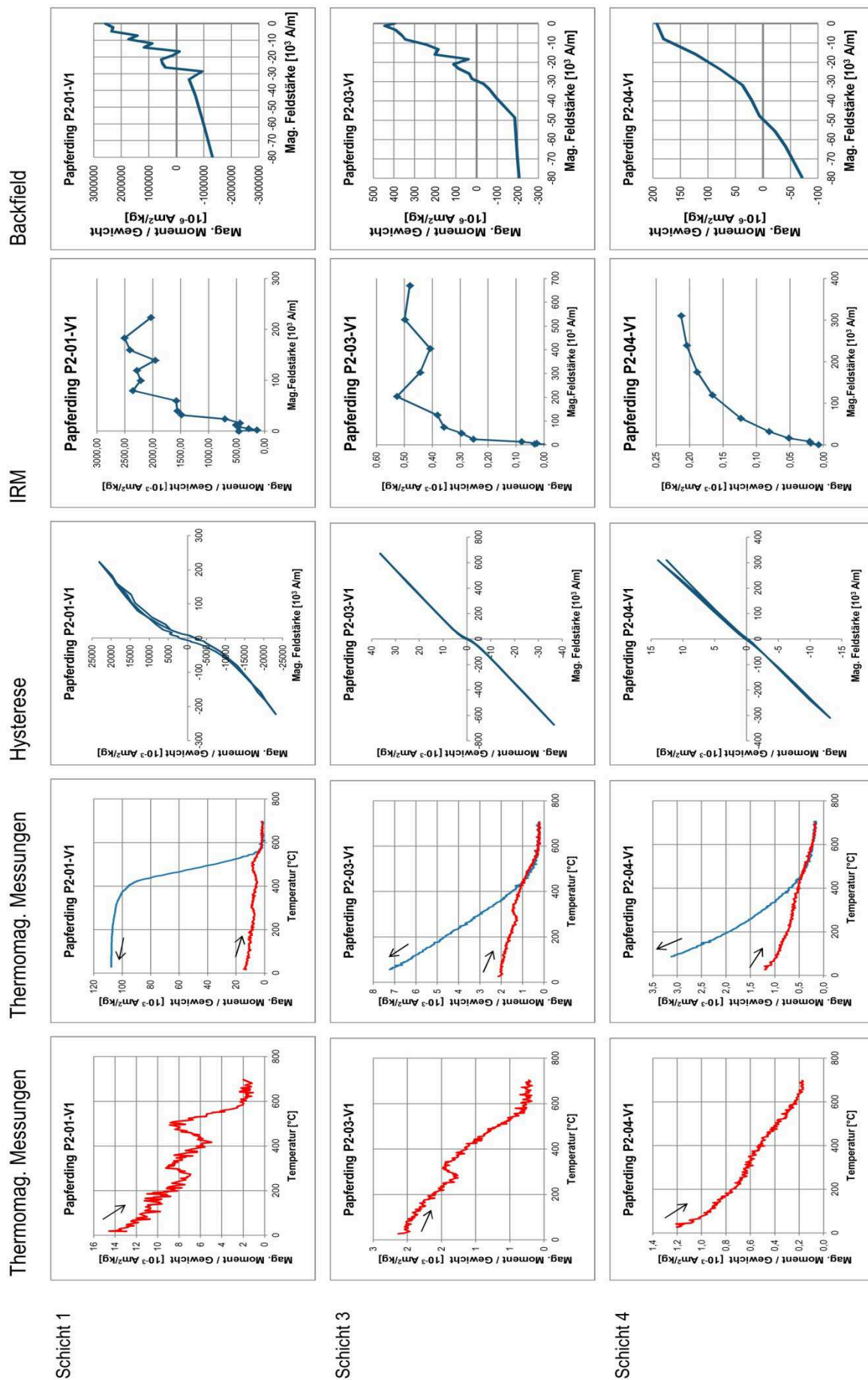
Anhang 2: Messkurven

A2.1. Thermomagnetische Kurven, Hysterese-, IRM- und Backfield- Kurven der Viereckschanze von Papferding

Um die Kurven jeweils einer Probe im Überblick nebeneinander abzubilden, wurde hier das Querformat gewählt.

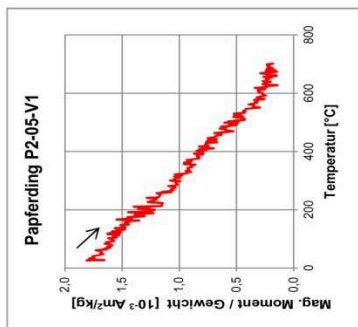
Achsenbeschriftungen:

- Thermomagnetische Kurven (Aufheizen sowie Aufheizen mit Abkühlen):
 - X- Achse: Temperatur [°C]
 - Y-Achse: Mag. Moment / Gewicht [$10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$]
- Hysteresekurven:
 - X-Achse: Mag. Feldstärke [10^3 A/m]
 - Y-Achse: Mag. Moment / Gewicht [$10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$]
- IRM-Kurven:
 - X-Achse: Mag. Feldstärke [10^3 A/m]
 - Y-Achse: Mag. Moment / Gewicht [$10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$]
- Backfield-Kurven:
 - X-Achse: Mag. Feldstärke [10^3 A/m]
 - Y-Achse: Mag. Moment / Gewicht [$10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg}$]

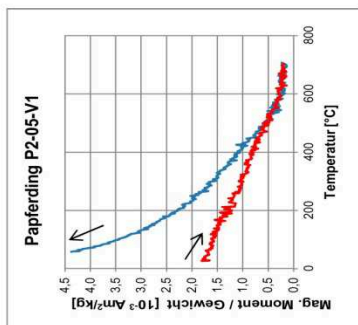


Schicht 5

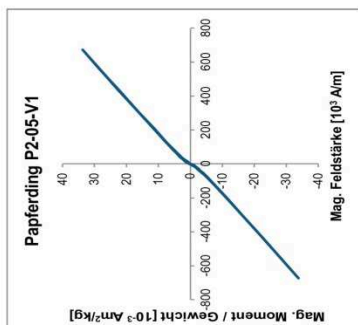
Thermomag. Messungen



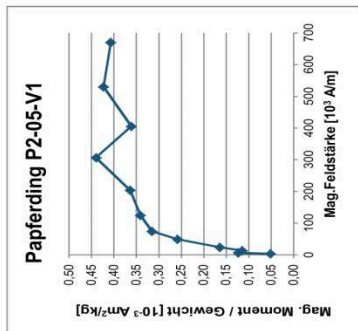
Thermomag. Messungen



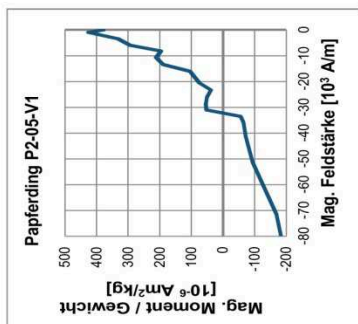
Hysteresis



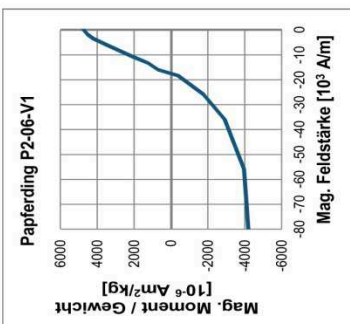
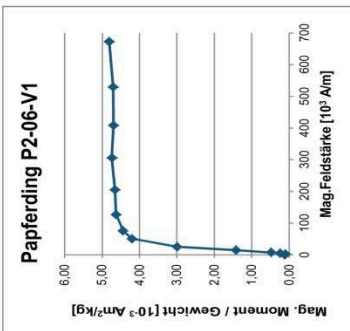
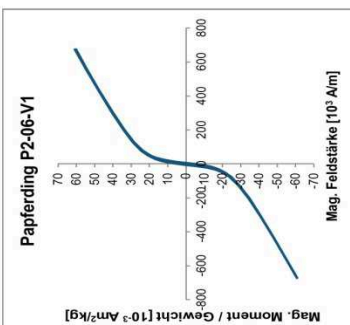
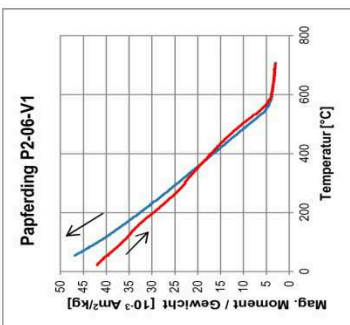
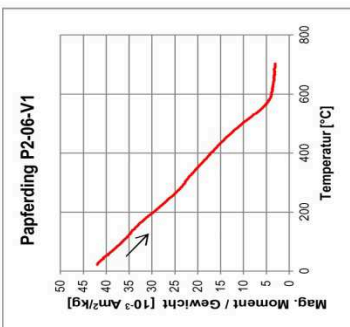
IRM



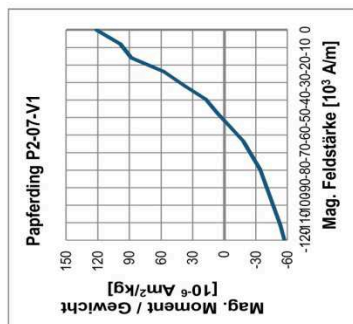
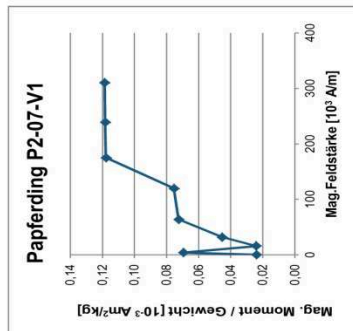
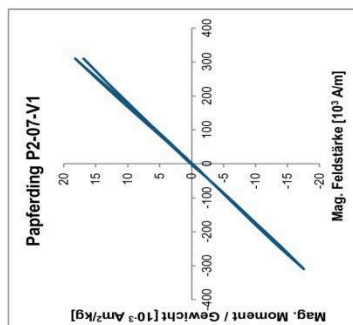
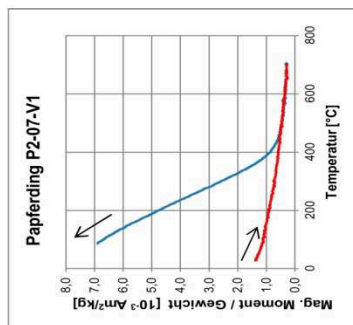
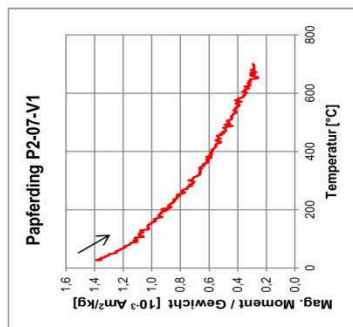
Backfield



Schicht 6



Schicht 7



Backfield

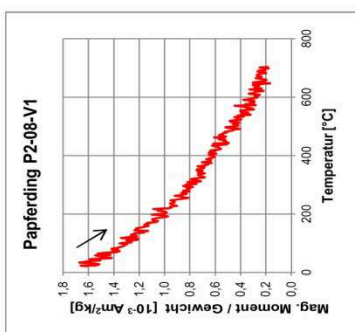
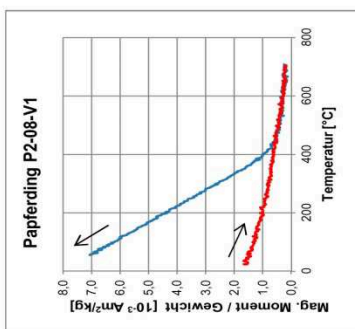
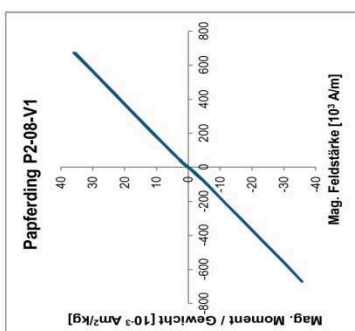
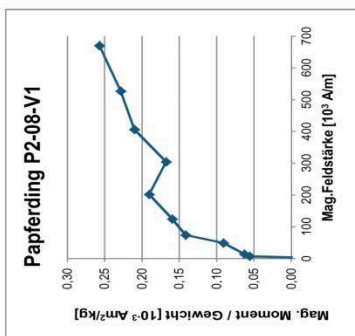
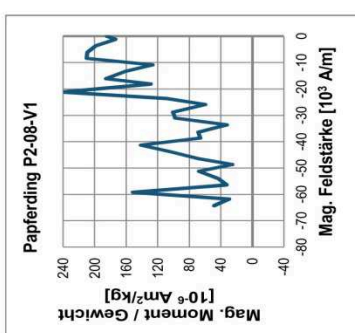
IRM

Hysteresis

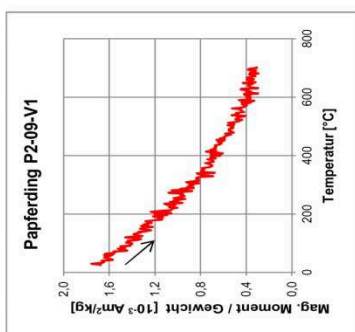
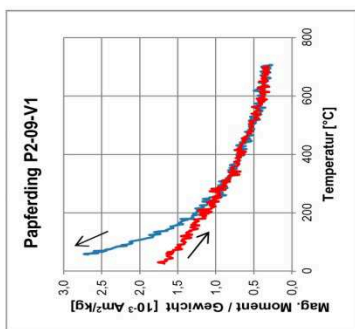
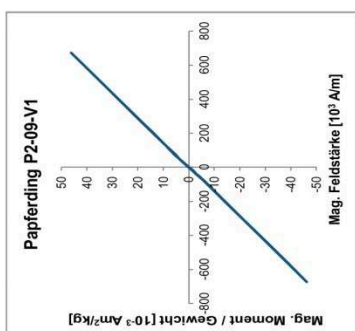
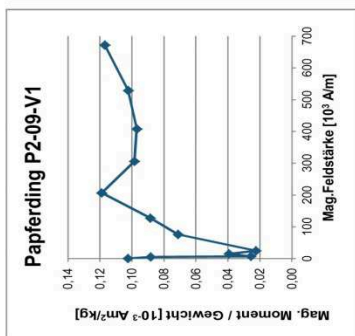
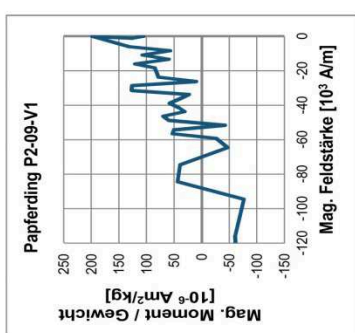
Thermomag. Messungen

Thermomag. Messungen

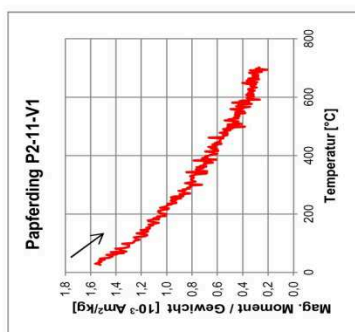
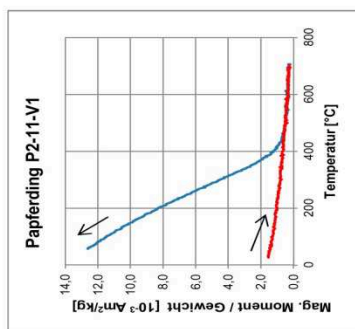
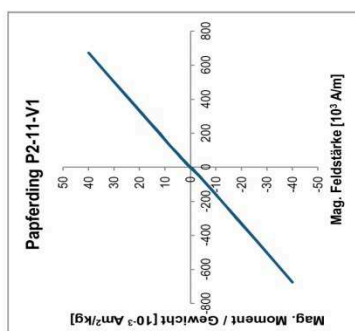
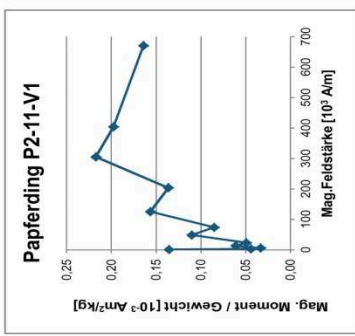
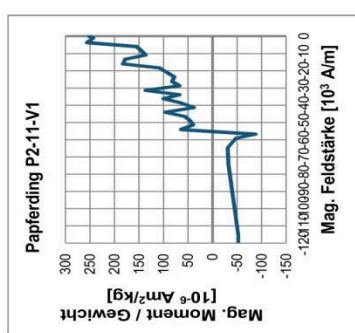
Schicht 8



Schicht 9



Schicht 11



Backfield

IRM

Hysteresis

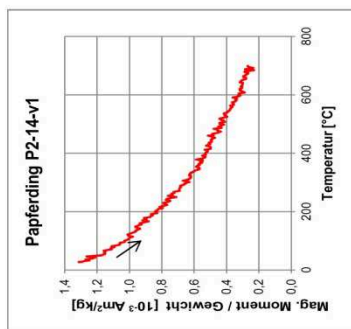
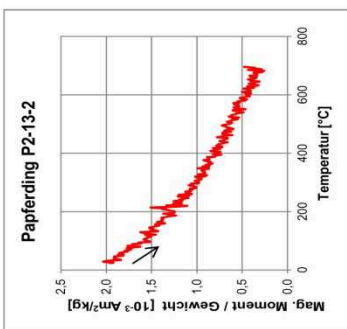
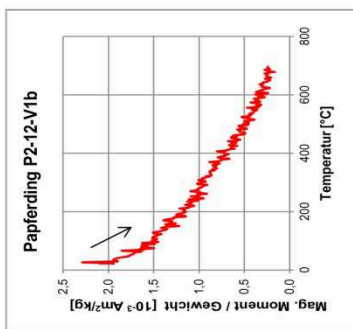
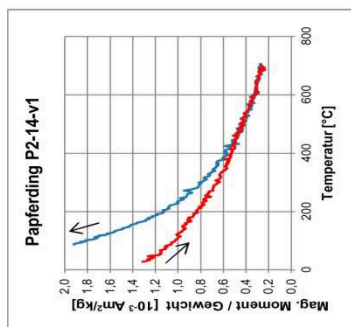
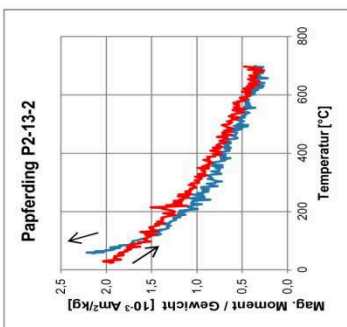
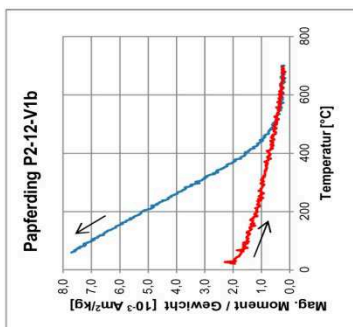
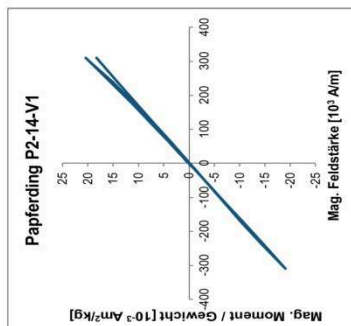
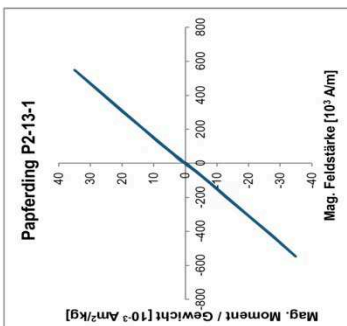
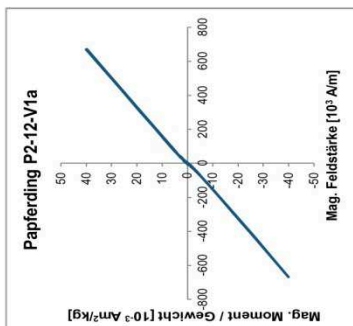
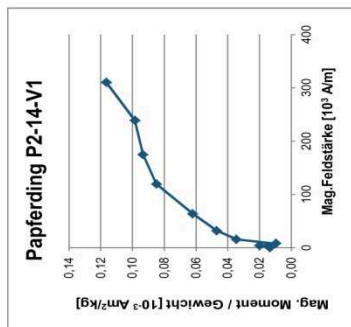
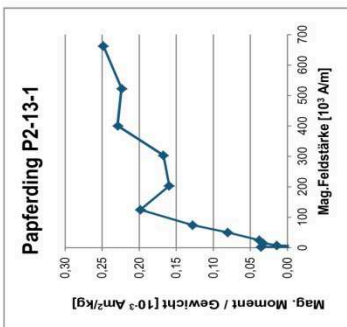
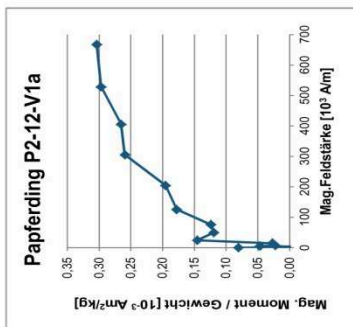
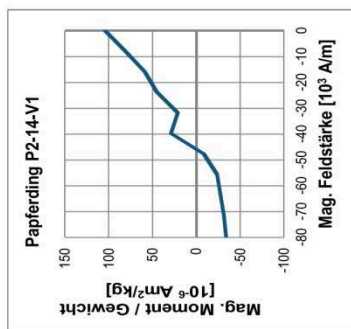
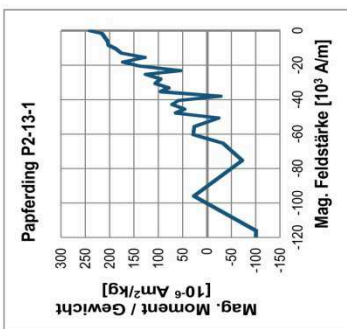
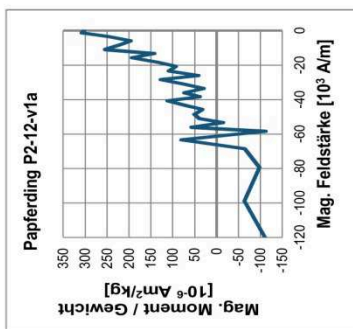
Thermomag. Messungen

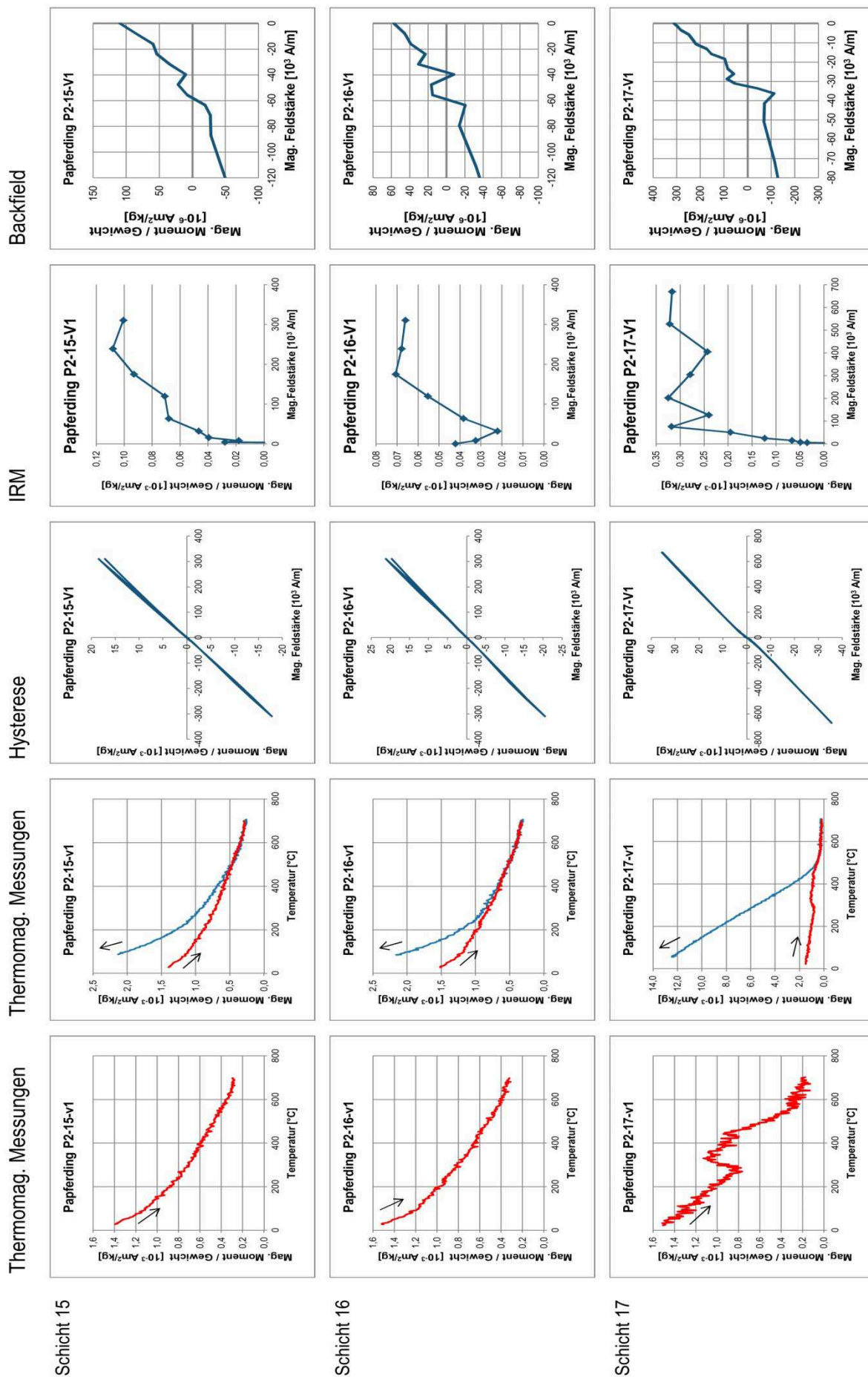
Thermomag. Messungen

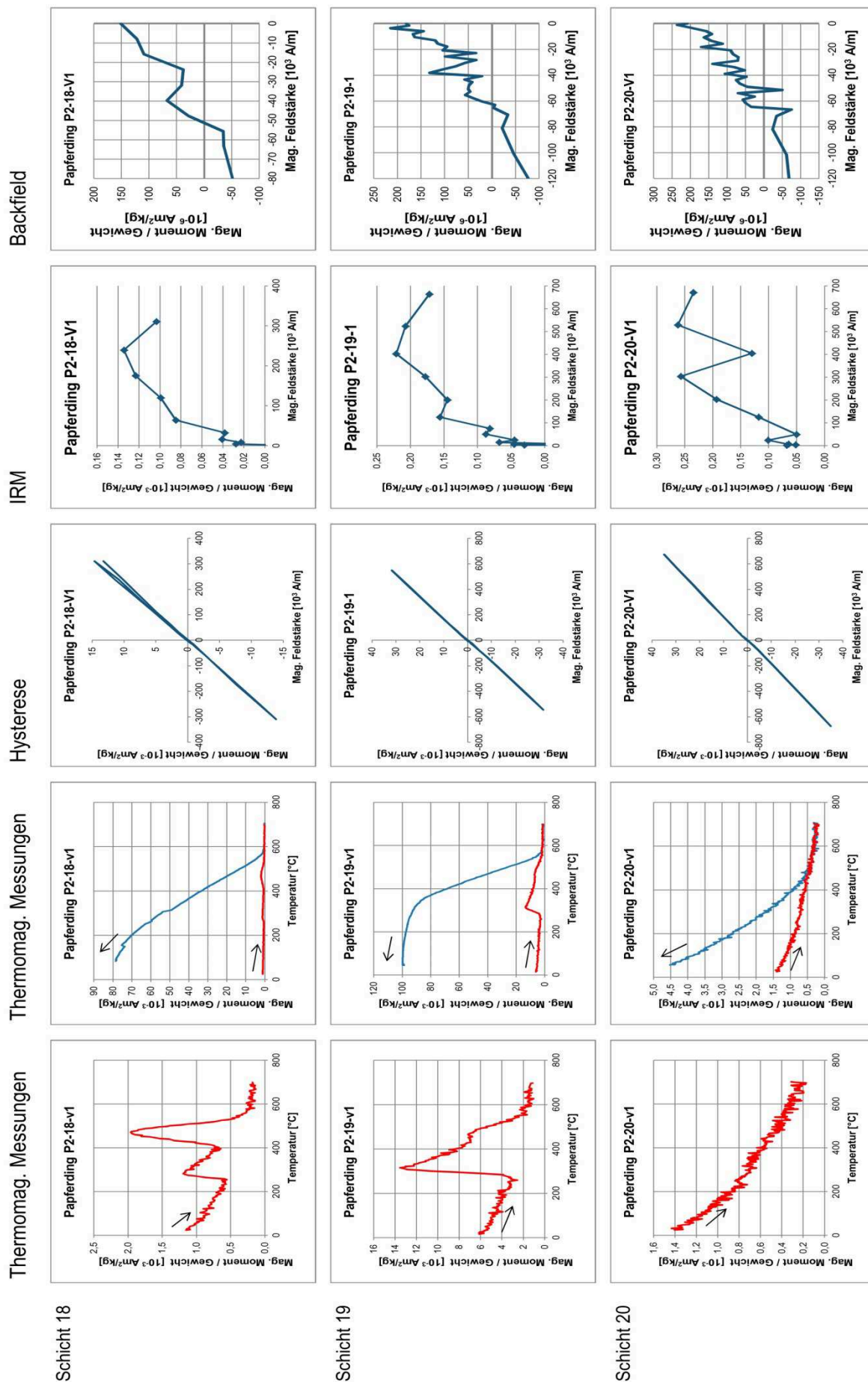
Schicht 12

Schicht 13

Schicht 14

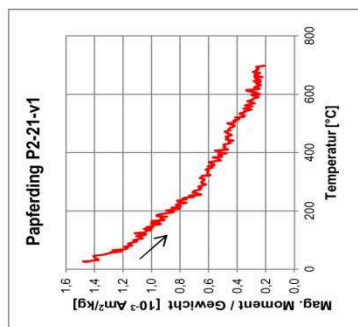




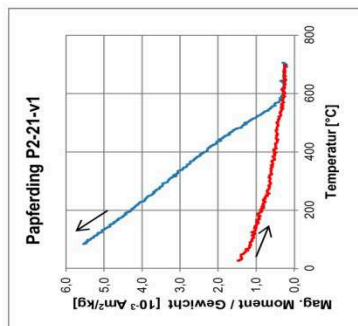


Schicht 21

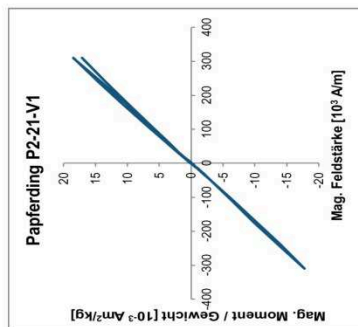
Thermomag. Messungen



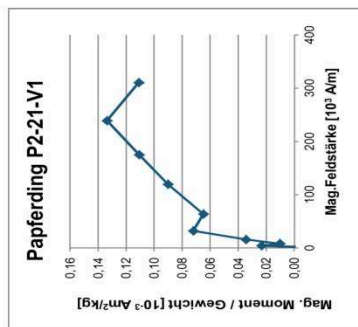
Thermomag. Messungen



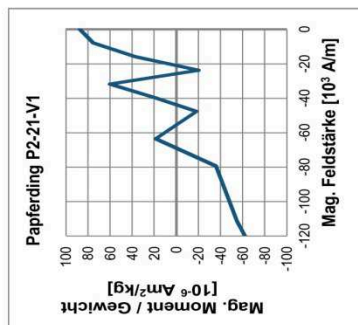
Hysteresis



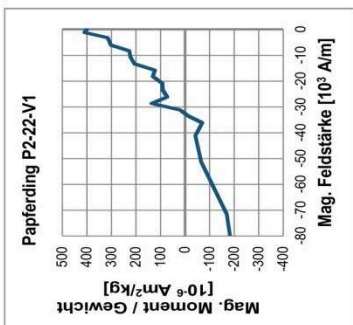
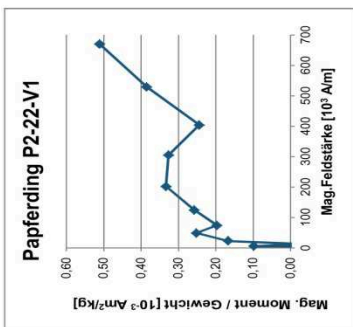
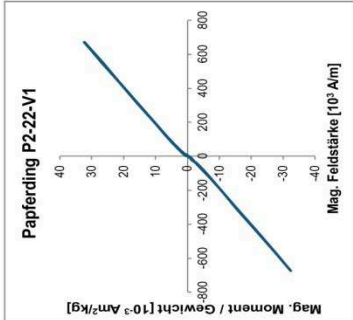
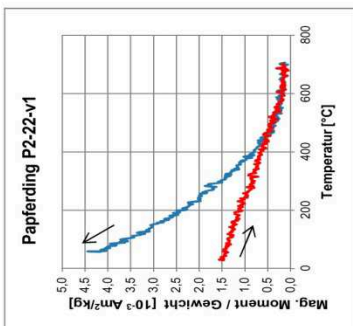
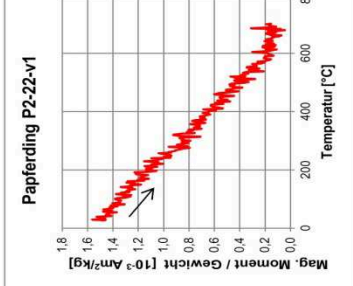
IRM



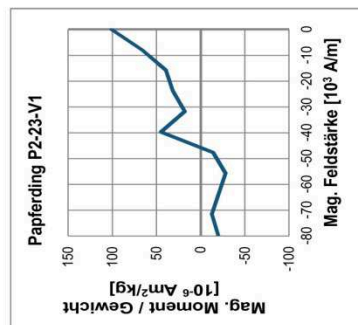
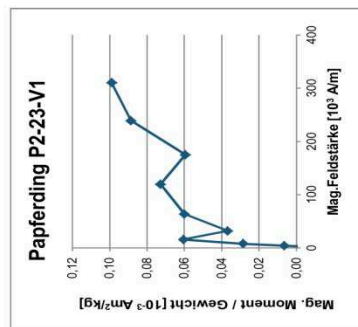
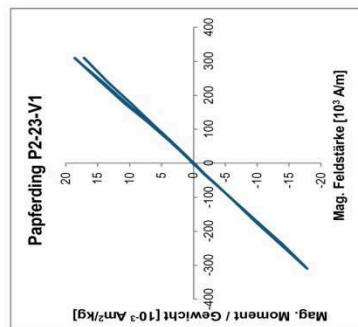
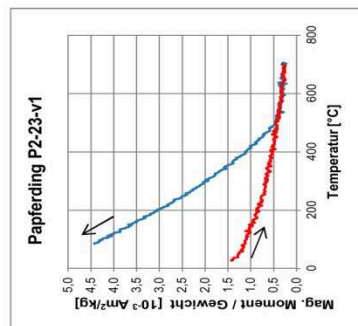
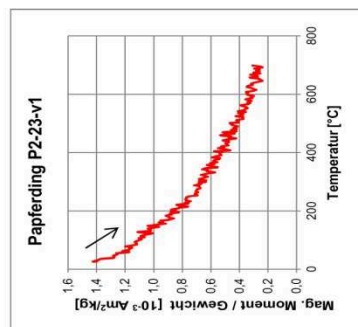
Backfield

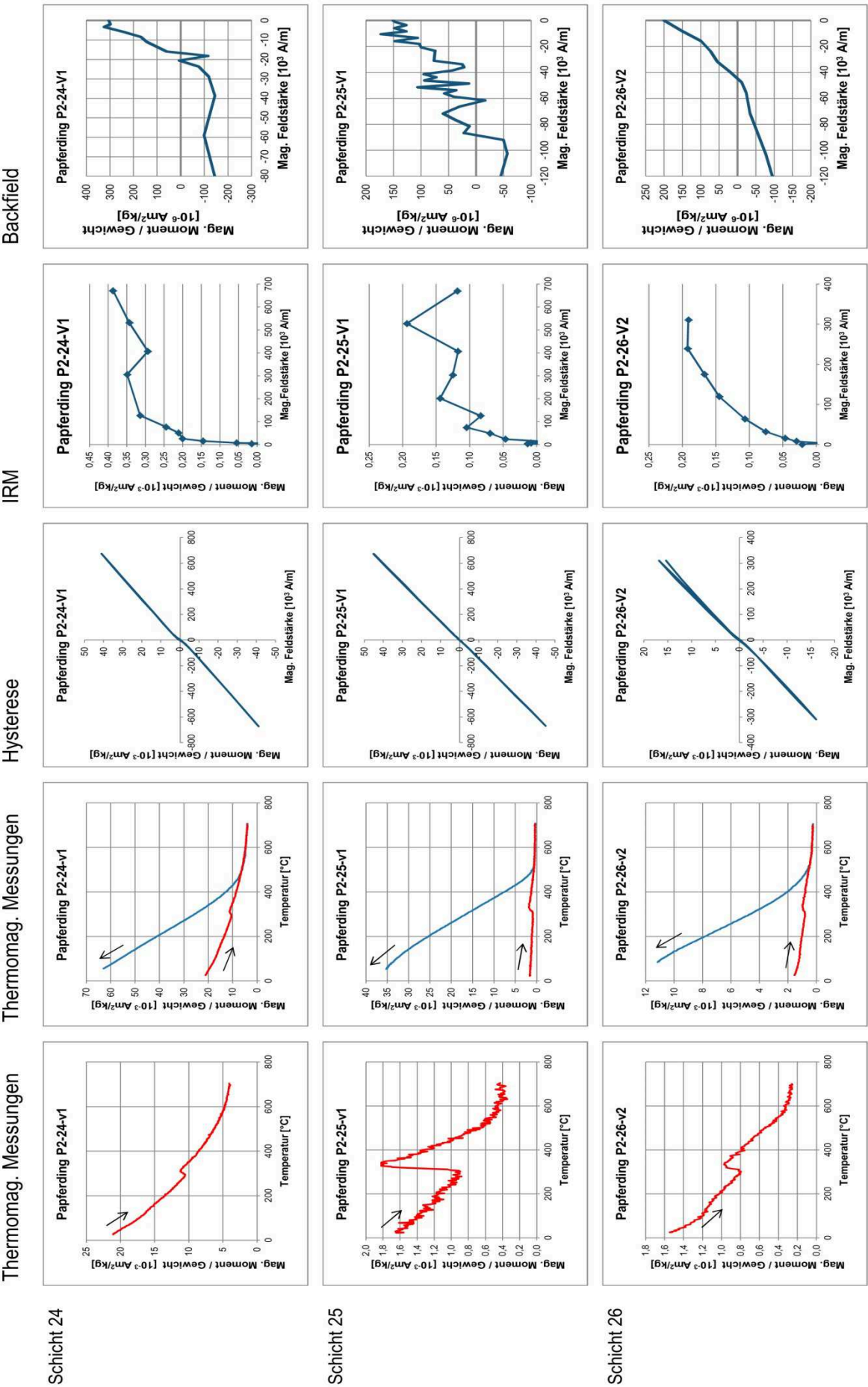


Schicht 22



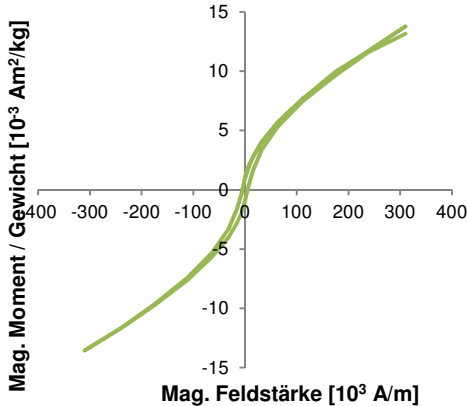
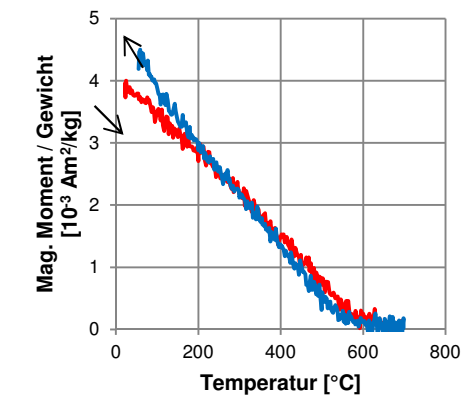
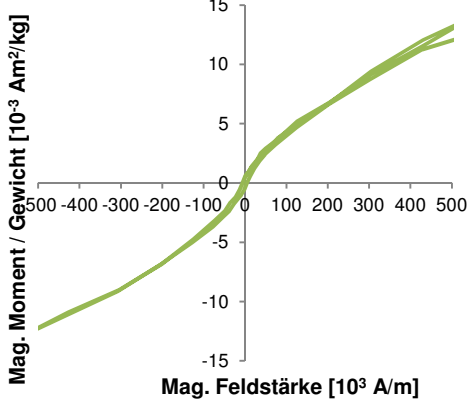
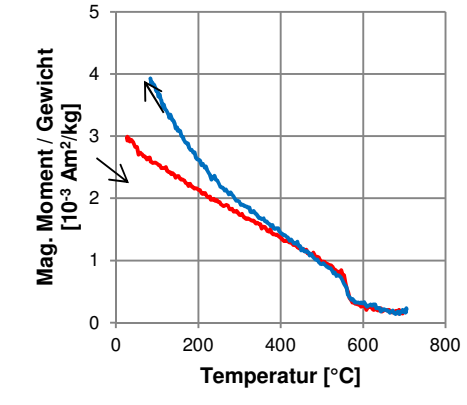
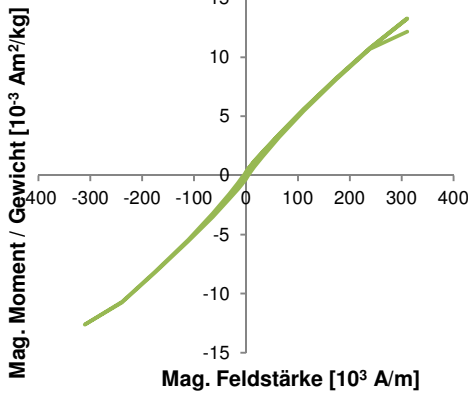
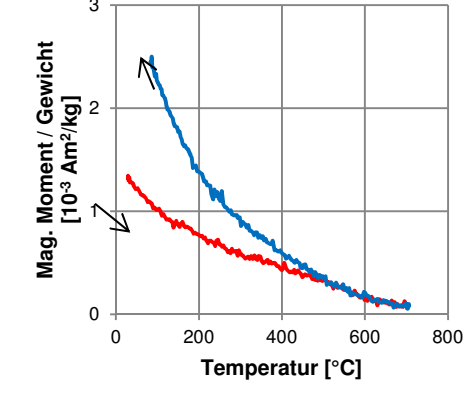
Schicht 23

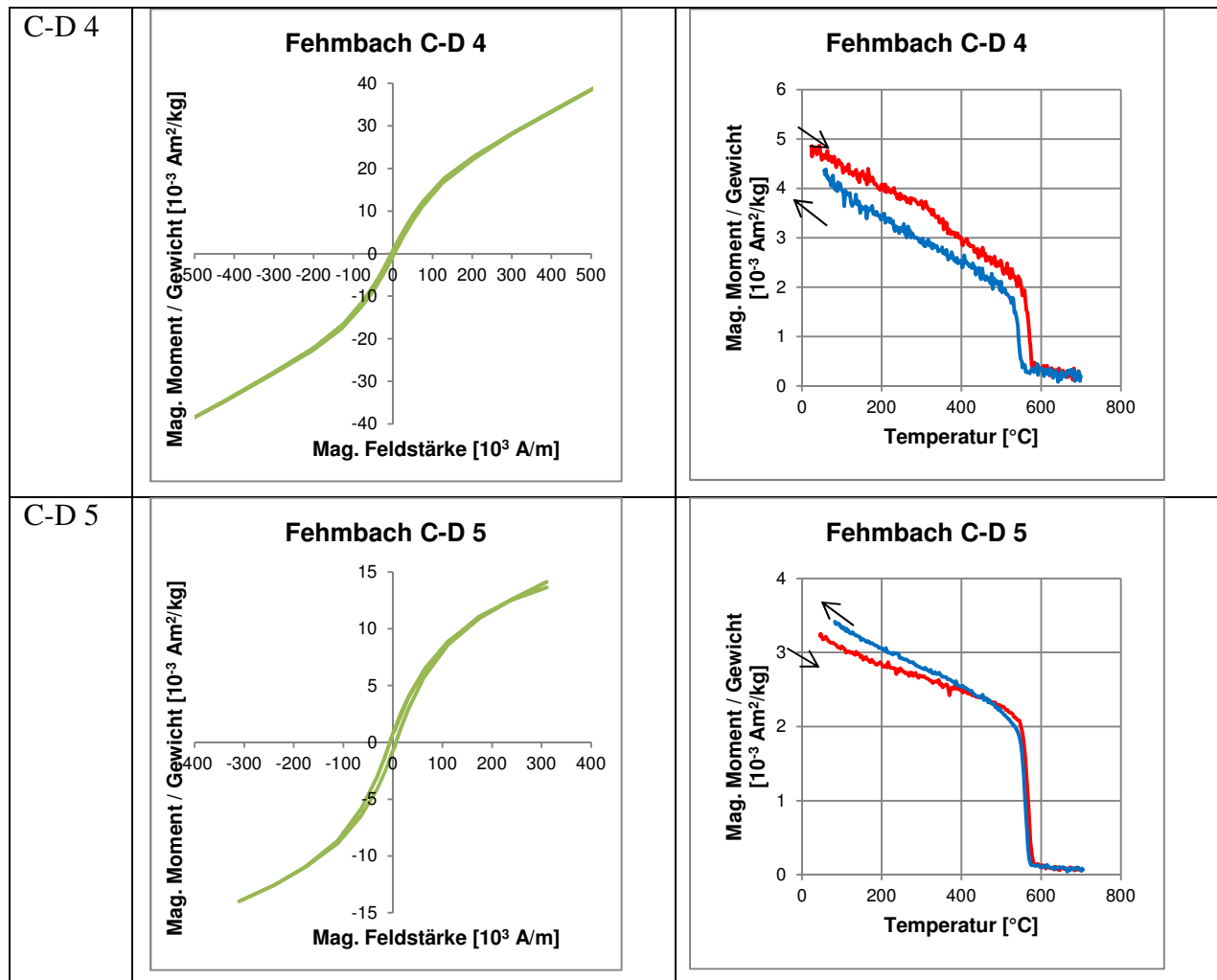




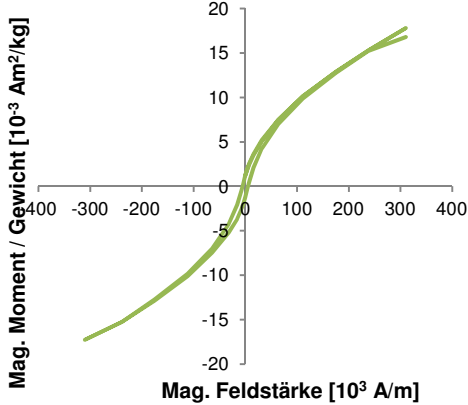
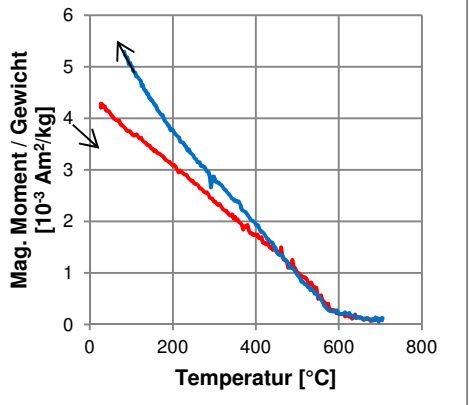
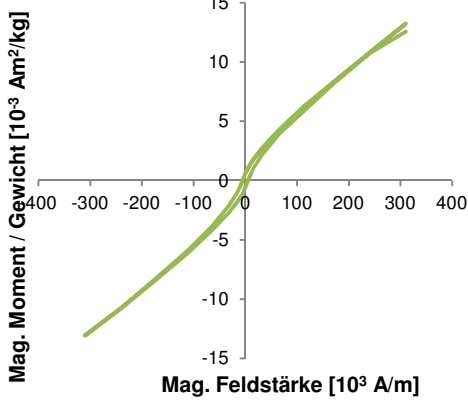
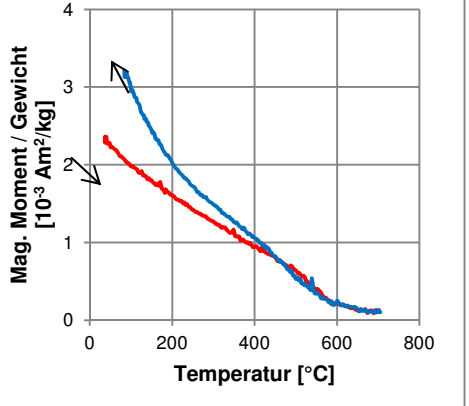
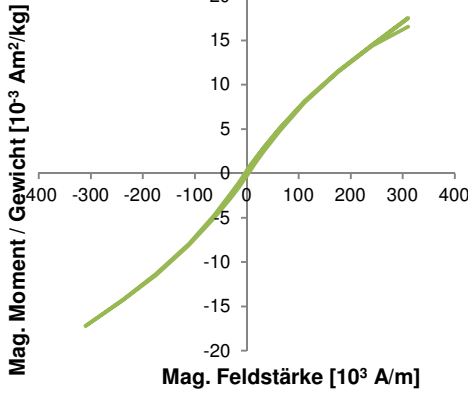
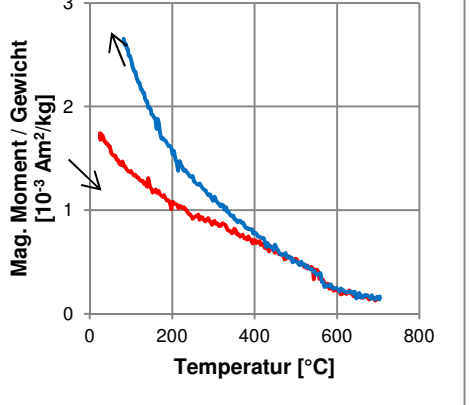
A2.2. Hysterese- und thermomagnetische Kurven der Viereckschanze von Fehmbach

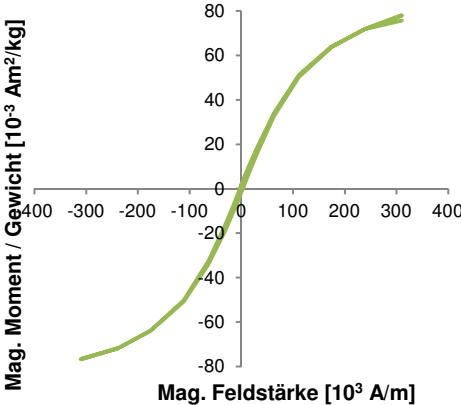
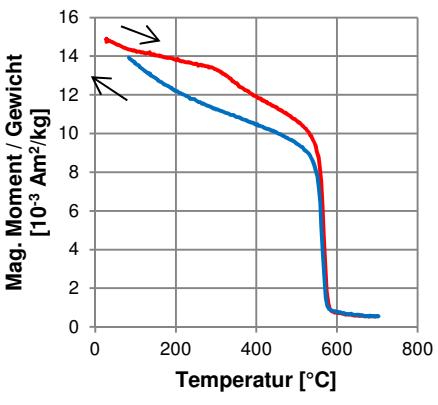
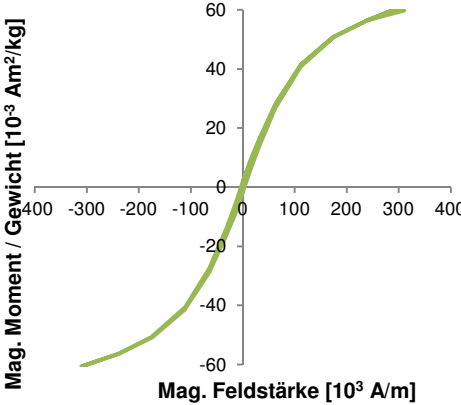
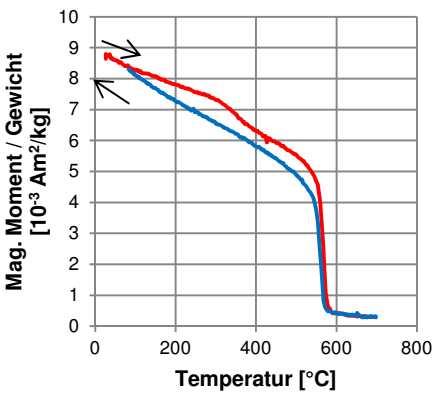
Profil C-D (Ostgraben)

	Profil C-D Hysterese	Profil C-D Thermomag. Kurven
C-D 1	<p>Fehmbach C-D 1</p> 	<p>Fehmbach C-D 1</p> 
C-D 2	<p>Fehmbach C-D 2</p> 	<p>Fehmbach C-D 2</p> 
C-D 3	<p>Fehmbach C-D 3</p> 	<p>Fehmbach C-D 3</p> 

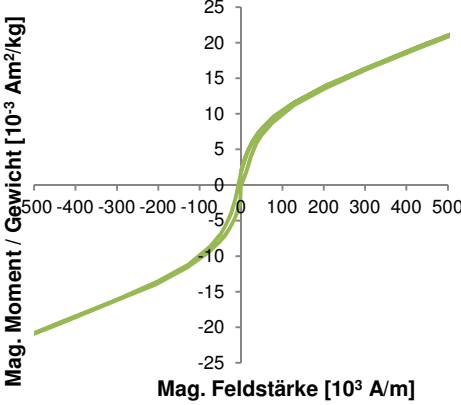
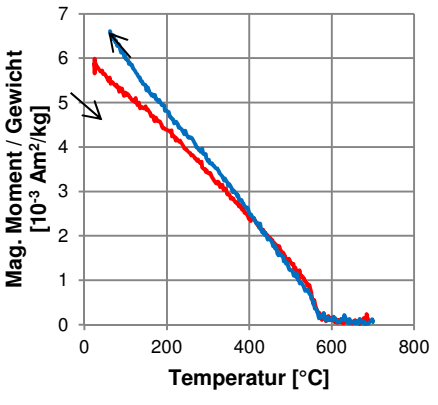


Profil E-F (Grabenecke)

	Profil E-F Hysteresese	Profil E-F Thermomag.Kurven
E-F 1	<p>Fehmbach E-F 1</p> 	<p>Fehmbach E-F 1</p> 
E-F 2	<p>Fehmbach E-F 2</p> 	<p>Fehmbach E-F 2</p> 
E-F 3	<p>Fehmbach E-F 3</p> 	<p>Fehmbach E-F 3</p> 

E-F 4	<p>Fehmbach E-F 4</p>  <p>Mag. Moment / Gewicht [$10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$]</p> <p>Mag. Feldstärke [10^3 A/m]</p>	<p>Fehmbach E-F 4</p>  <p>Mag. Moment / Gewicht [$10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$]</p> <p>Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]</p>
E-F 5	<p>Fehmbach E-F 5</p>  <p>Mag. Moment / Gewicht [$10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$]</p> <p>Mag. Feldstärke [10^3 A/m]</p>	<p>Fehmbach E-F 5</p>  <p>Mag. Moment / Gewicht [$10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$]</p> <p>Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]</p>

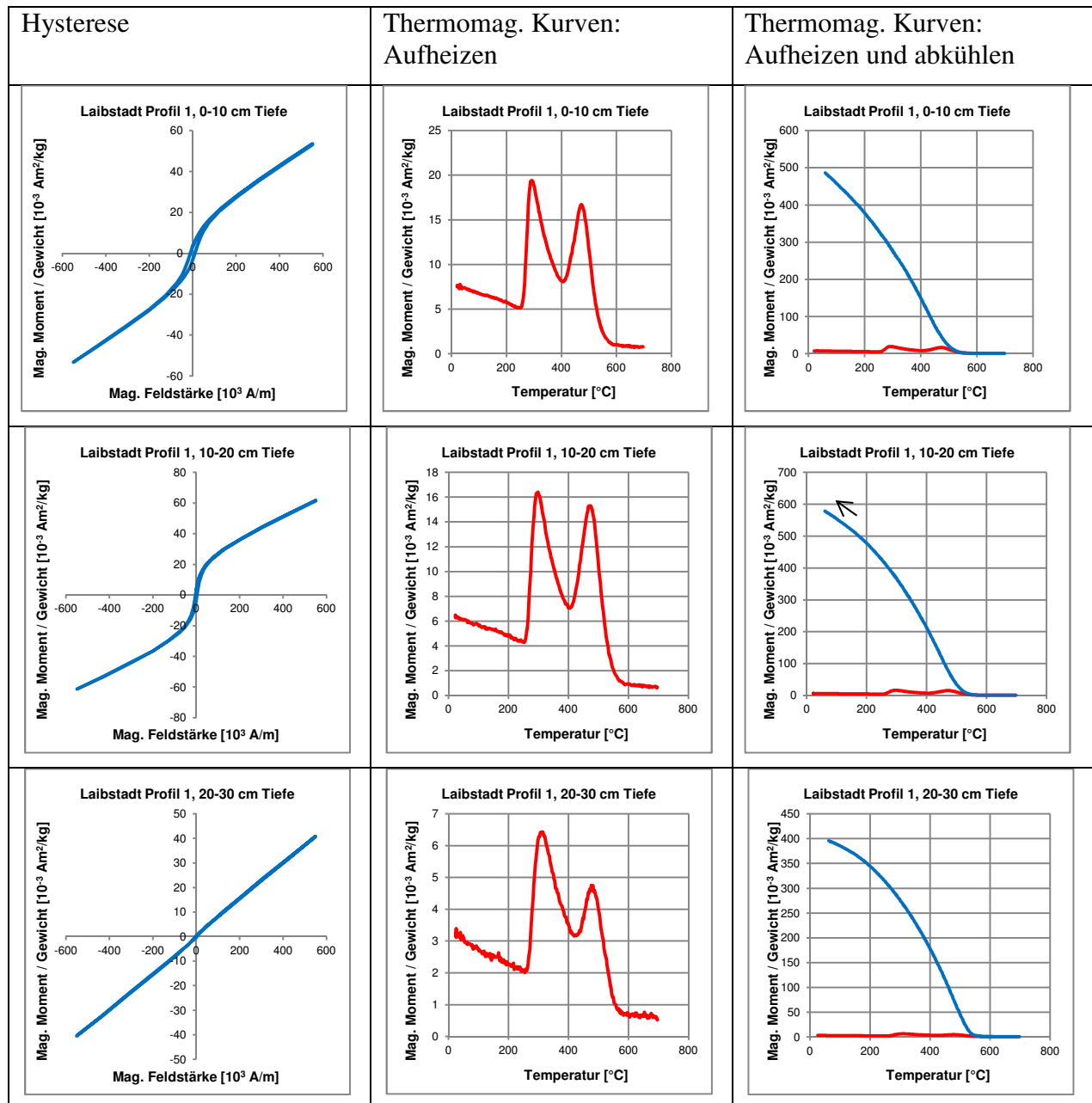
„Pfosten 2“

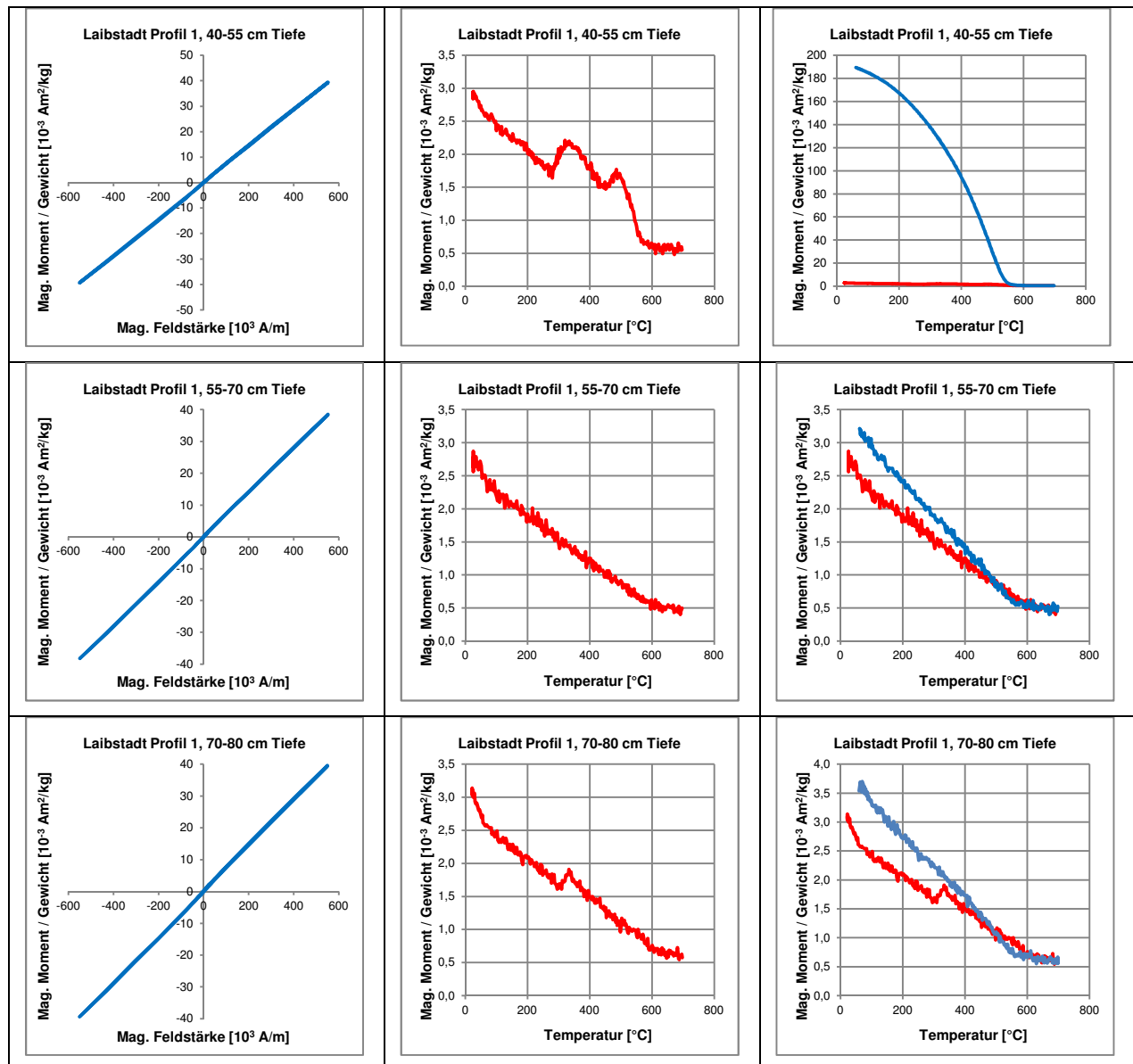
Pf 2	Hysterese	Thermomag. Kurven
	<p>Fehmbach Pfosten 2</p>  <p>Mag. Moment / Gewicht [$10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$]</p> <p>Mag. Feldstärke [10^3 A/m]</p>	<p>Fehmbach Pfosten 2</p>  <p>Mag. Moment / Gewicht [$10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$]</p> <p>Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]</p>

A2.3. Hysterese- und thermomagnetische Kurven der Viereckschanze von Laibstadt

Dargestellt sind Hysteresekurven und die thermischen Aufheiz- und Abkühlzyklen in den einzelnen Profilen, jeweils von oben nach unten mit zunehmender Tiefe.

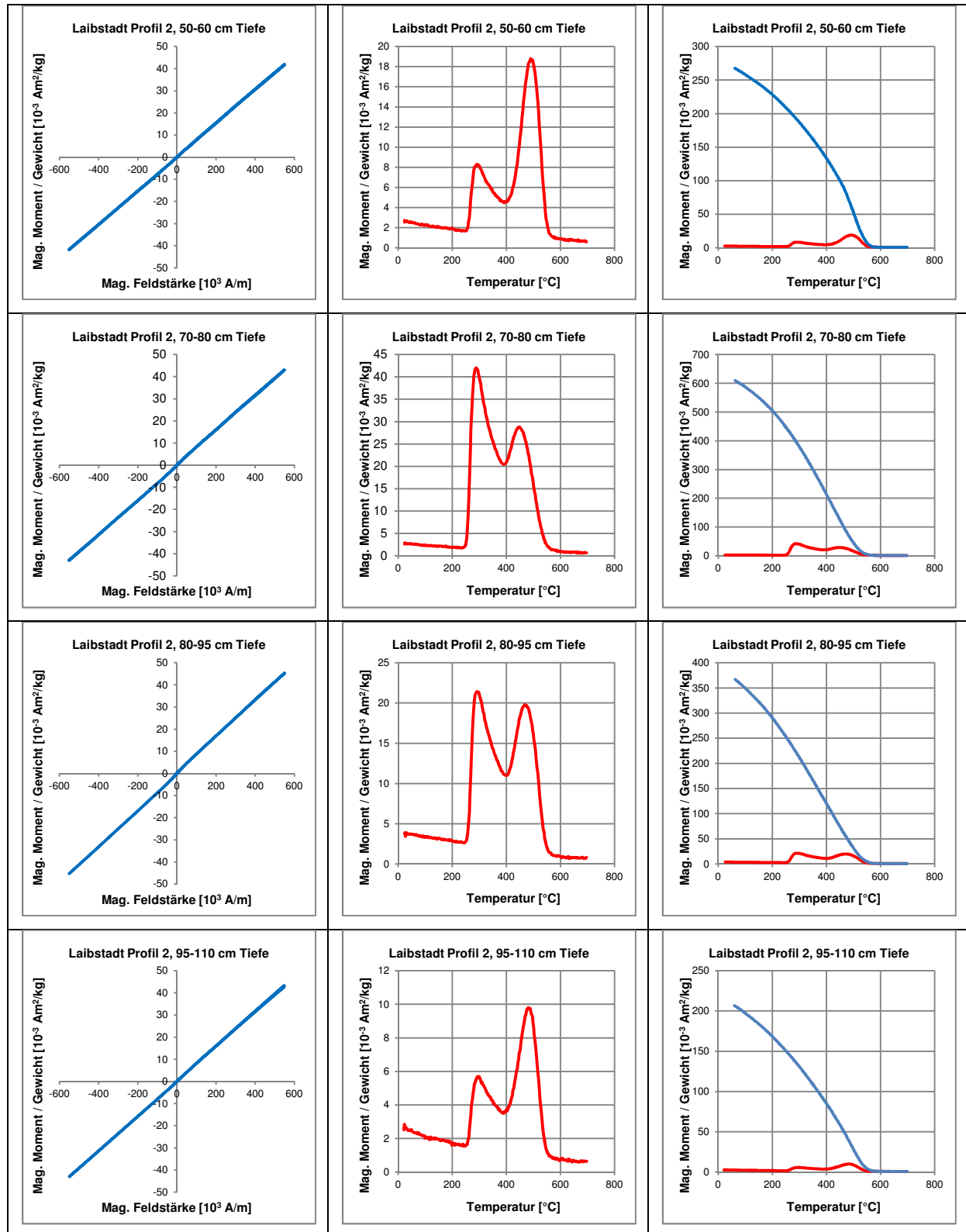
Profil 1: Bereich außerhalb der Viereckschanze

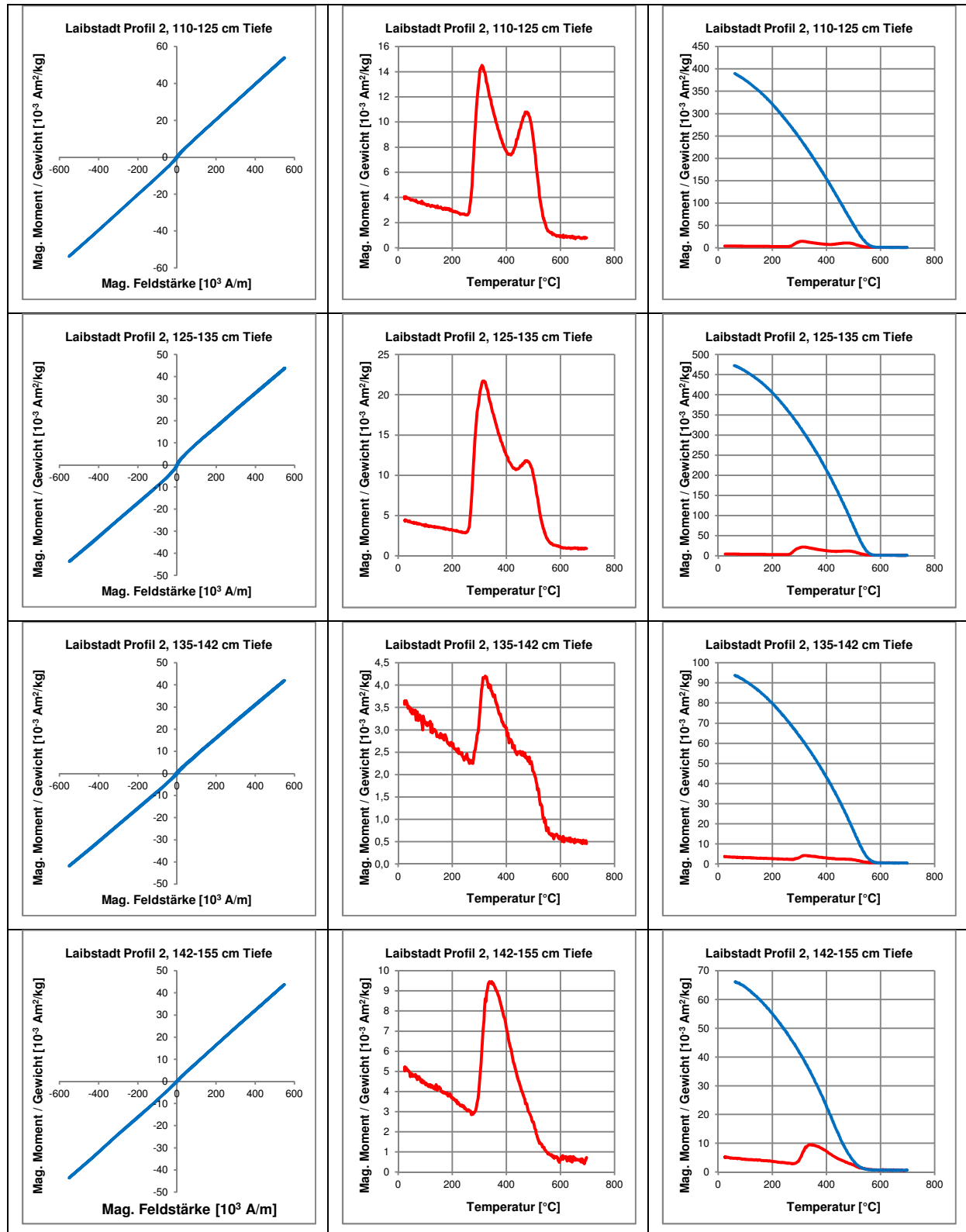




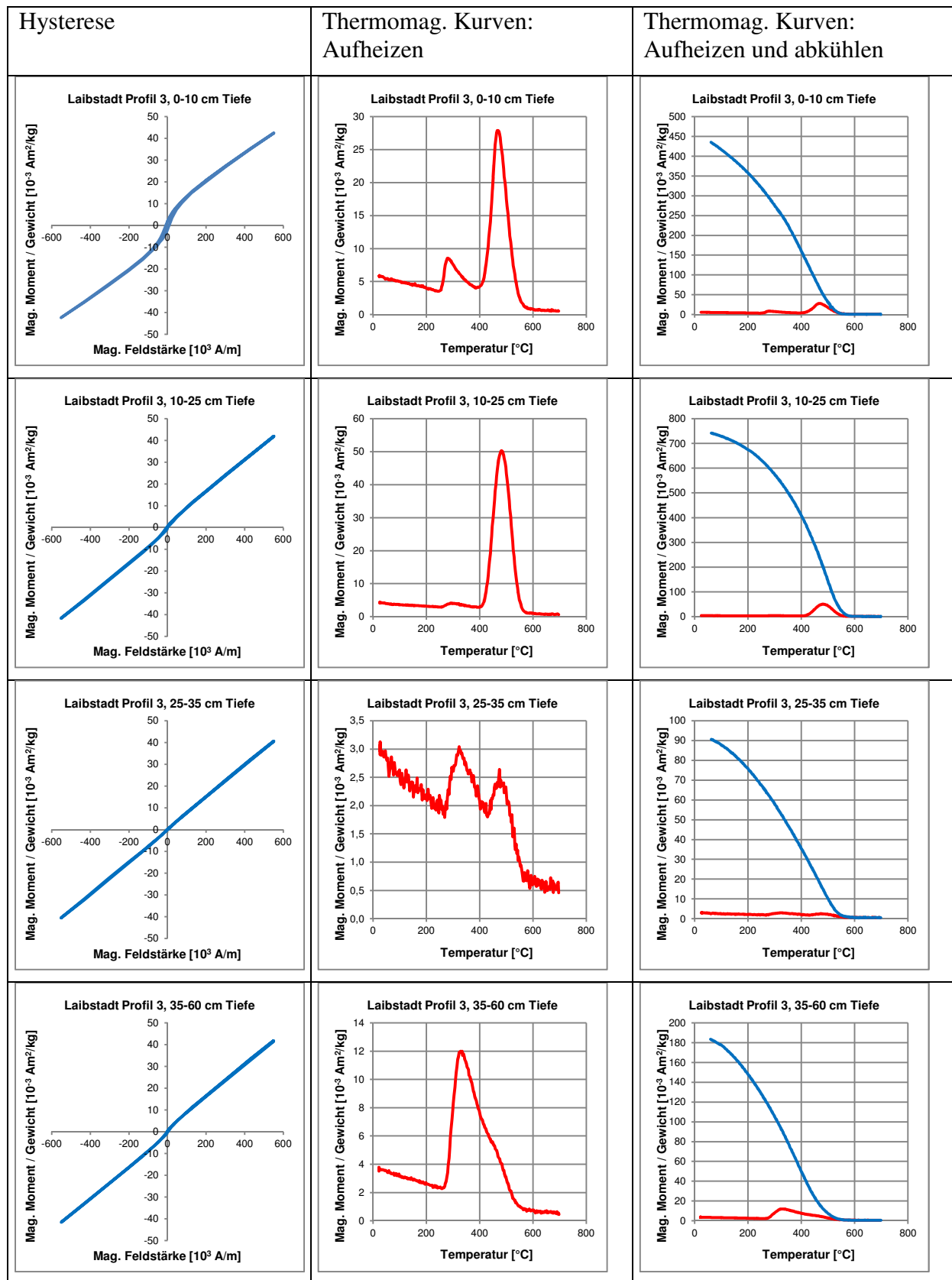
Profil 2: Grabenfüllung

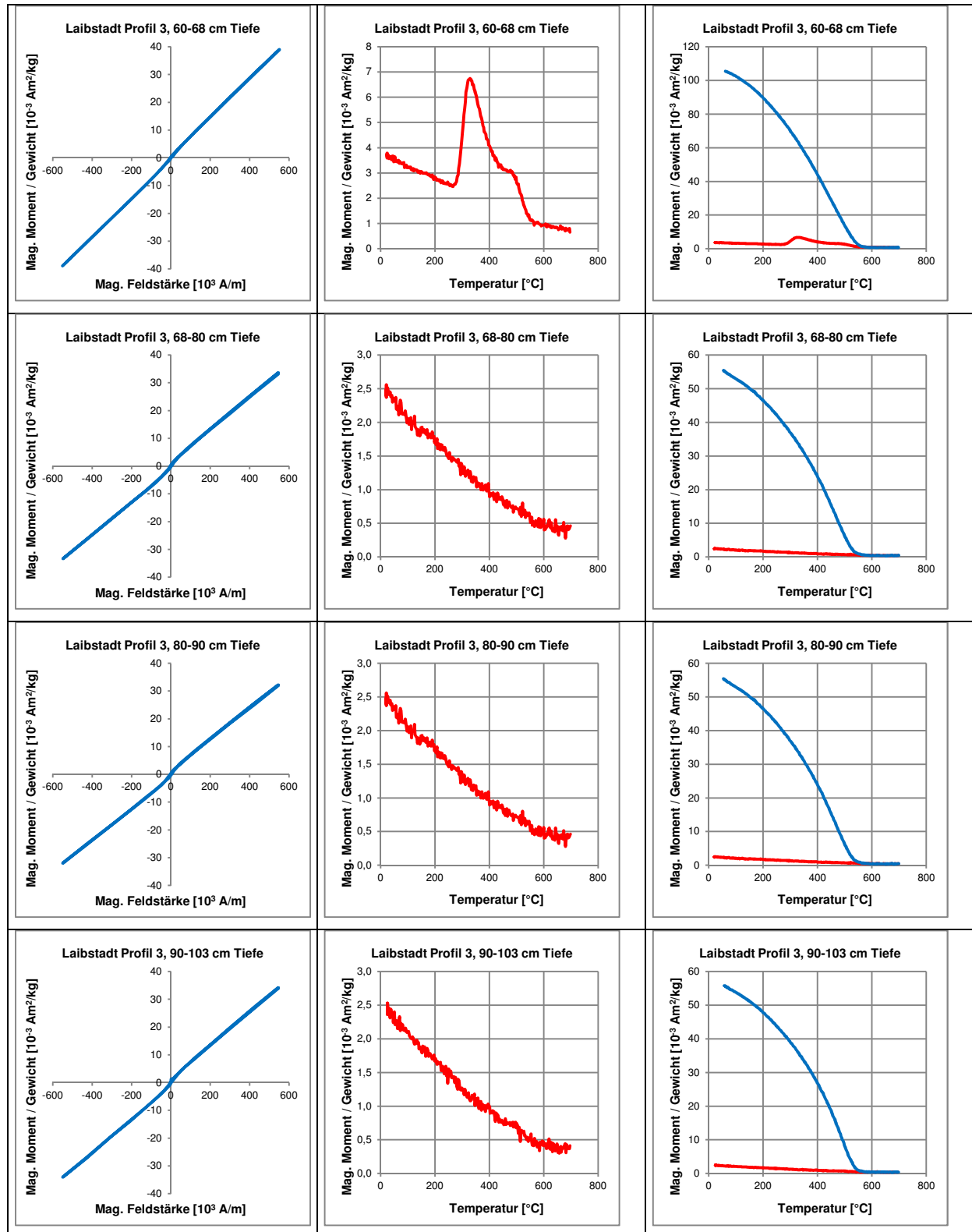
Hysteresis	Thermomag. Kurven: Aufheizen	Thermomag. Kurven: Aufheizen und abkühlen
<p>Laibstadt Profil 2, 0-5 cm Tiefe</p>	<p>Laibstadt Profil 2, 0-5 cm Tiefe</p>	<p>Laibstadt Profil 2, 0-5 cm Tiefe</p>
<p>Laibstadt Profil 2, 5-20 cm Tiefe</p>	<p>Laibstadt Profil 2, 5-20 cm Tiefe</p>	<p>Laibstadt Profil 2, 5-20 cm Tiefe</p>
<p>Laibstadt Profil 2, 20-35 cm Tiefe</p>	<p>Laibstadt Profil 2, 20-35 cm Tiefe</p>	<p>Laibstadt Profil 2, 20-35 cm Tiefe</p>
<p>Laibstadt Profil 2, 35-50 cm Tiefe</p>	<p>Laibstadt Profil 2, 35-50 cm Tiefe</p>	<p>Laibstadt Profil 2, 35-50 cm Tiefe</p>



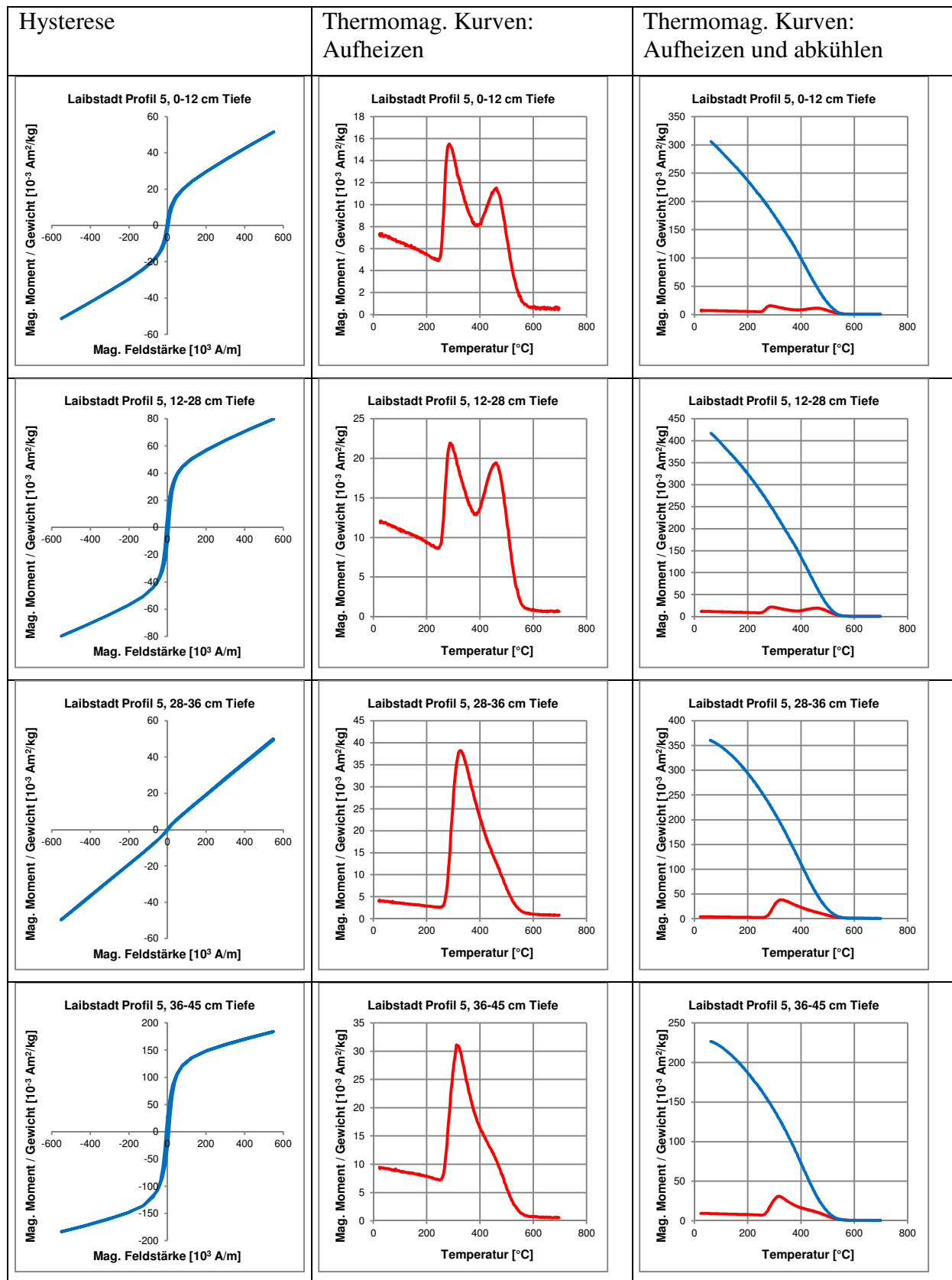


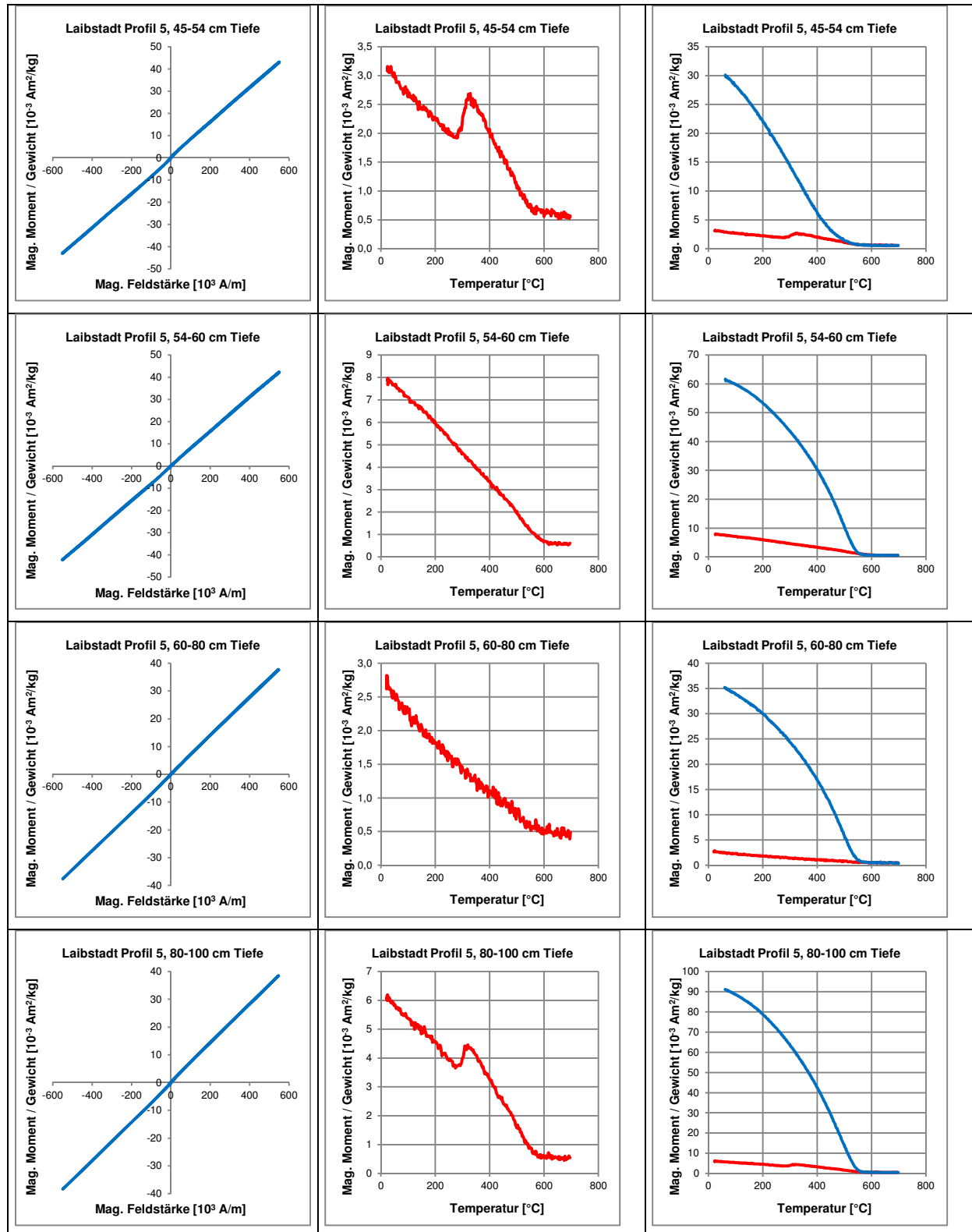
Profil 3: Wallbereich / heutige Wallkrone

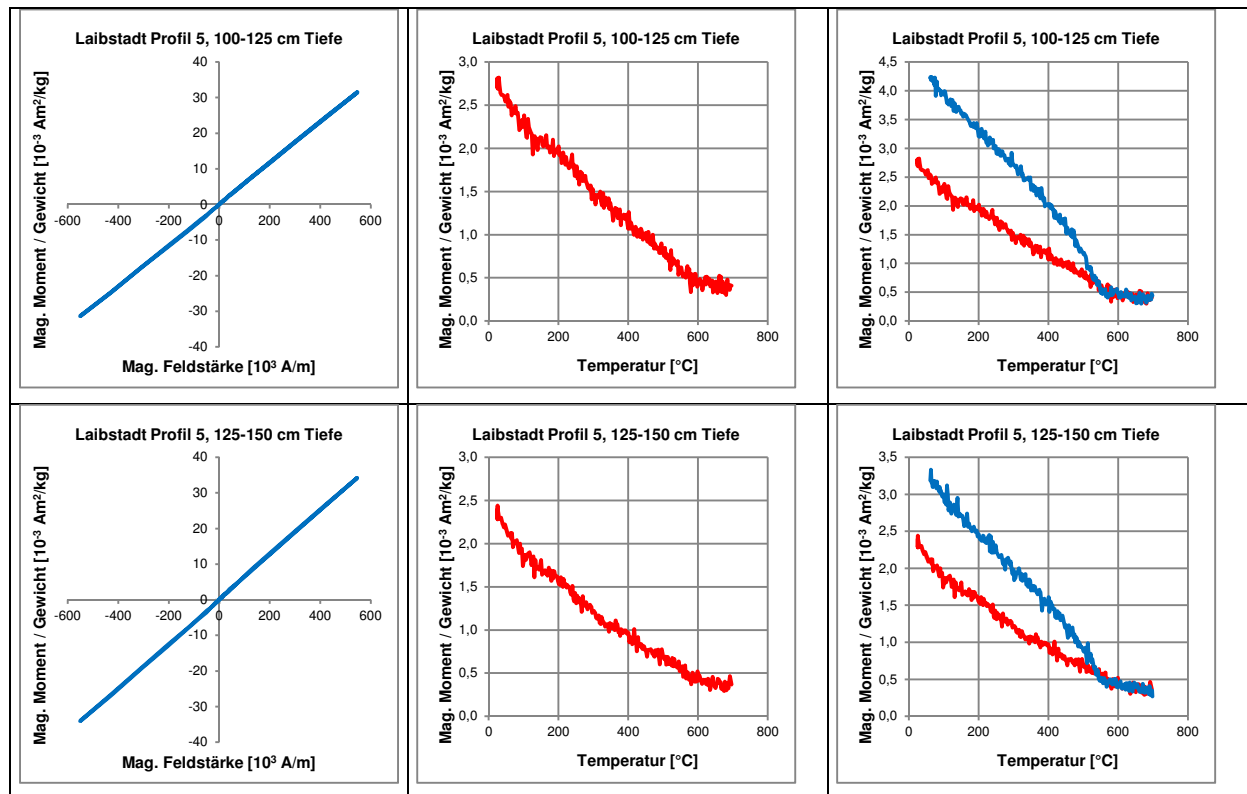




Profil 5: Innenraum mit positiver Anomalie







Anhang 3. Katalog der prospektierten Viereckschanzen

Die Ordnung der Viereckschanzen erfolgt von West nach Ost, wobei Anlagen innerhalb einzelner Regierungsbezirke zusammengefasst werden.

Nr.	Ort	Regierungsbezirk	Landkreis	Gemeinde
1	Beuren	Schwaben	Neu-Ulm	Pfaffenhofen a. d. Roth
2	Baisweil	Schwaben	Ostallgäu	Baisweil
3	Weiltingen	Mittelfranken	Ansbach	Weiltingen
4	Eybburg	Mittelfranken	Ansbach	Arberg
5	Laibstadt	Mittelfranken	Roth	Heideck
6	Hechendorf-Güntering	Oberbayern	Starnberg	Seefeld
7	Egweil	Oberbayern	Eichstätt	Egweil
8	Aubing / Moosswaige	Oberbayern	München	München
9	Buchendorf	Oberbayern	Starnberg	Gauting
10	Neufahrn	Oberbayern	Bad Tölz-Wolfratshausen	Egling
11	Manching	Oberbayern	Pfaffenhofen a. d. Ilm	Manching
12	Feldmoching	Oberbayern	München	München (Stadt)
13	Holzhausen	Oberbayern	München	Straßlach-Dingharting
14	Deisenhofen 3 (Wald)	Oberbayern	München	Oberhaching
15	Deisenhofen 1 (Feld)	Oberbayern	München	Oberhaching
16	Teufstetten	Oberbayern	Erding	Wörth
17	Reithofen	Oberbayern	Erding	Pastetten
18	Papferding	Oberbayern	Erding	Bockhorn
19	Loipfing	Oberbayern	Erding	Isen
20	Maxing	Oberbayern	Mühldorf am Inn	Erharting
21	Sondermoning	Oberbayern	Traunstein	Nußdorf
22	Oberhaimbuch	Oberpfalz	Regensburg	Mötzing
23	Pfeffenhausen	Niederbayern	Landshut	Pfeffenhausen
24	Oberframmering	Niederbayern	Dingolfing-Landau	Landau a. d. Isar
25	Fehmbach	Niederbayern	Deggendorf	Stephansposching
26	Plattling-Pankofen	Niederbayern	Deggendorf	Plattling
27	Manndorf	Niederbayern	Deggendorf	Buchhofen

Tab. A1: Überblick über die am BLfD durchgeführten Magnetometerprospektionen.

Die angegebenen Daten im Einzelnen:

- Fortlaufende Nummer wie in der Liste angegeben. Die Nummer wird nur hier in dieser Arbeit verwendet.
- Ortsname.
- Lage: Regierungsbezirk, Landkreis, Gemeinde, Gemarkung.
- BLfD Luftbildnummer.
- BLfD Fundstellennummer mit Maßnahme-Nummer der Magnetometerprospektion.
- Gauß-Krüger-Koordinaten (x, y).
- Geologie: Die Angaben zur Geologie stammen aus dem GeoFachdatenAtlas (Bodeninformationssystem Bayern), Bayerisches Landesamt für Umwelt, Version 4.0-09 (06.05.2010), www.bis.bayern.de. Kartengrundlage: Geologische Karte 1:500.000 (BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT [1996]) bzw. 1:25.000 sowie Standortkundliche Landschaftsgliederung 1:1.000.000.
- Boden: Die Angaben zum Boden stammen aus dem GeoFachdatenAtlas (Bodeninformationssystem Bayern), Bayerisches Landesamt für Umwelt, Version 4.0-09 (06.05.2010), www.bis.bayern.de. Kartengrundlage: Bodenkarte 1:200.000 bzw. Konzeptbodenkarte 1:25000.
Falls hier lokal keine Eintragungen vorhanden sind, wird die Bodenkundliche Übersichtskarte 1:500000, Hrsg. Bayerisches Geologisches Landesamt, München 1955, herangezogen. Dies ist jeweils in den Angaben vermerkt.
Ergänzende Angaben, falls vorhanden, auch aus SCHWARZ [2007] oder den sonstigen, jeweils im Punkt „Literatur“ angegebenen Quellen.
- Geländebeschreibung: Sie orientiert sich an den Digitalen Ortskarten und Höhenlinienkarten aus dem Flächeninformationssystem (FIS) des BLfD bzw. der dort verwendeten Kartengrundlagen der Bayerischen Vermessungsverwaltung. Auch die im Punkt „Literatur“ angegebenen Quellen fließen mit ein. Hier wird, auch als Anhaltspunkt für die frühere hydrologische Situation, die Geländeoberfläche und -neigung sowie die heutige Lage von Wasserläufen angesprochen.
- Erhaltungszustand: Angaben bei obertägigen Schanzen aus SCHWARZ [2007].
- Nutzung aktuell (bzw. zum Zeitpunkt der Prospektion) und in Uraufnahmen und ggf. Renovation, jeweils mit Jahreszahl der Kartengrundlage.
- Ggf. Bemerkungen.
- Zeitraum der Prospektion: Bei früheren Prospektionen konnte nur das Jahr angegeben werden, die neueren Prospektionen sind taggenau aufgeführt.
- Prospektiert von: Angabe aller Ausführenden der Prospektion.
- Literatur: Wichtige Literatur zur Viereckschanze; auch Literaturangabe der Magnetometerprospektion, falls diese bereits publiziert wurde.

Als Abbildungen dargestellt werden jeweils ein Luftbild, ein Magnetogramm und ein Interpretationsplan der Anlage. Die Pläne wurden freundlicherweise digitalisiert von Josef Lichtenauer und Roland Linck.

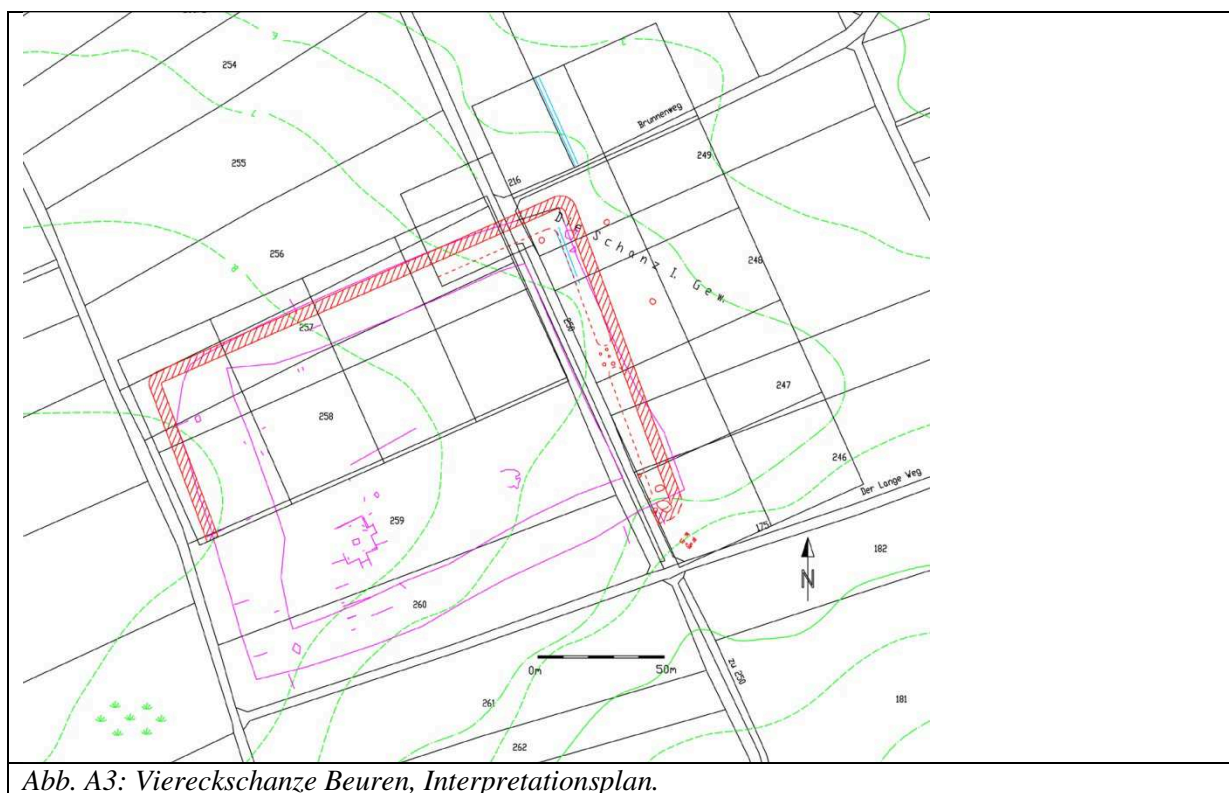
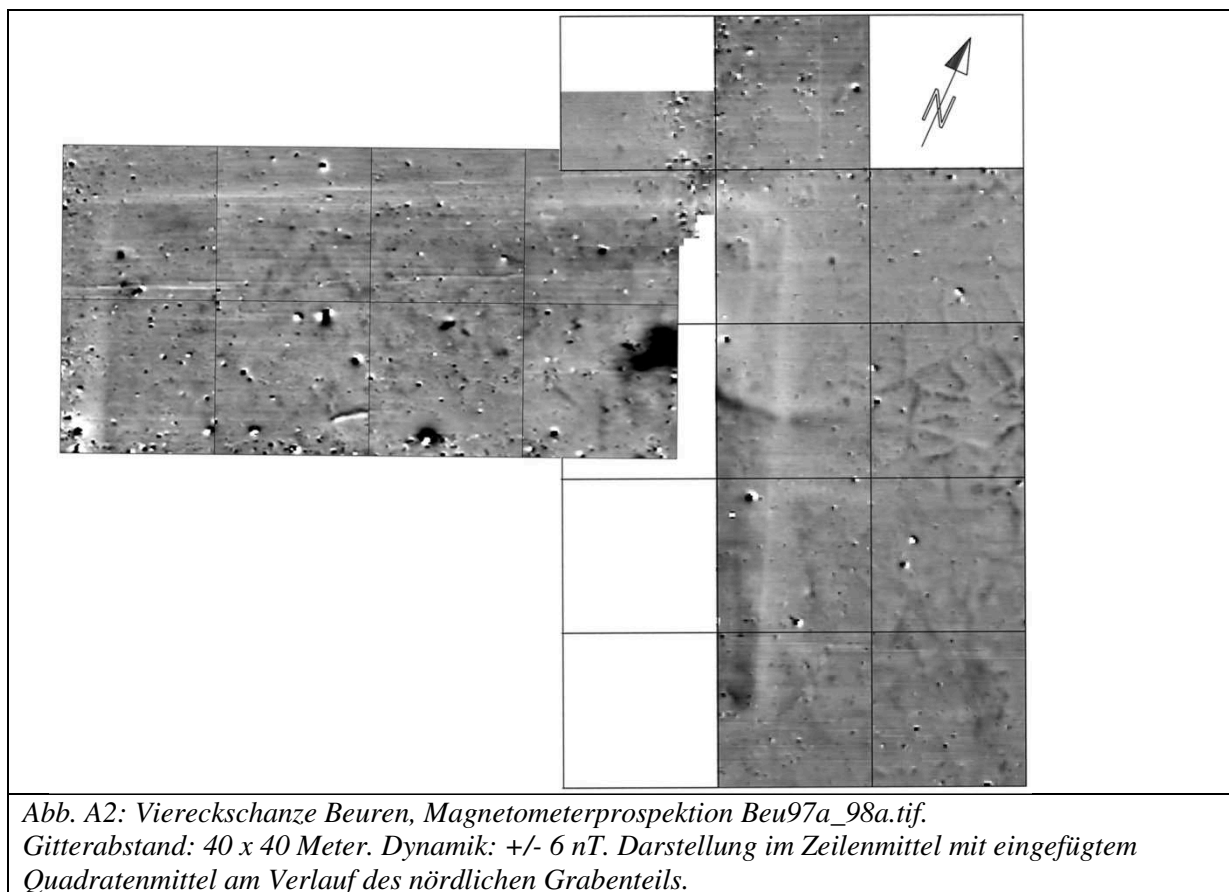
Falls kein Luftbild existiert, wird ein Orthophoto aus dem Flächeninformationssystem (FIS) des BLfD oder ein Digitales Geländemodell herangezogen; Quelle für beide Optionen: Bayerische Vermessungsverwaltung.

Alle hier gelisteten Prospektionen wurden durchgeführt mit Cäsiummagnetometern am Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege.

1	Beuren
Lage	Schwaben, Lkr. Neu-Ulm, Gde. Pfaffenhofen a. d. Roth, Gmkg. Beuren
BLfD Luftbildnummer	L 7726/100-1
Fundstelle / Maßnahme Nr.	D-7-7627-0070 / M-2009-1083
Gauß-Krüger-Koord.	4365534, 5358708
Geologie	Schotter, donau- bis günzzeitlich (Älterer Deckenschotter) - Kies, sandig, z.T. Konglomerat. Östlich der Anlage: Obere Süßwassermolasse, ungegliedert - Ton, Schluff, Mergel, Sand. Westlich: Löß, Lößlehm, Decklehm, Schluff.
Boden	Braunerde, z. T. pseudovergleyt, aus Lößlehm und Deckenschotter. – Grabungsergebnis: Lössschicht bis zu 1 Meter dick, darunter stark verlehnte Deckenschotter. Sehr staunasser Boden, mit Drainagen aus Tonrohren.
Geländebeschreibung	Fast eben; am Osthang einer sehr leichten Geländekuppe. Hangneigung im Schanzenbereich nach Osten und Süden hin jeweils etwa 3 Meter. – Vermutlich Quelle nahe der Nordostecke der Anlage. Durch ihren Ostteil verläuft ein nach Süden entwässernder Graben. Weiterhin kleine Wasserläufe 250 Meter südlich sowie mehrere 100 Meter entfernt nördlich der Schanze (hangabwärts).
Erhaltungszustand	Verebnet, nur Nordwall noch als minimale Erhebung vorhanden.
Nutzung aktuell	Landwirtschaft
Uraufnahme 1823	Landwirtschaft
Zeitraum der Prospektion	1997/98
Prospektiert von:	Becker
Literatur	WISCHENBARTH [1996] – AMBS [1999] – BVGB [1999] – WIELAND [1999] 192ff. – BVGB [2001] – AMBS [2011] – BERGHAUSEN [2011]



Abb. A1: Viereckschanze Beuren, BLfD Luftbild Nr. 7726_100_7969_21 vom 16.08.1998, Fotograf: K. Leidorf. Blickrichtung von Norden. Grabung am Ort der Viereckschanze.



2	Baisweil
Lage	Schwaben, Lkr. Ostallgäu, Gde. + Gmkg. Baisweil
BLfD Luftbildnummer	L 8128/056-2
Fundstelle / Maßnahme Nr.	D-7-8029-0001 / M-2009-1120
Gauß-Krüger-Koord.	4390333, 5311374
Geologie	Schotter (Niederterrasse, Spätglazialterrasse, Altmoräne) – sandiger Kies. Altmoränen, Schotterriedel.
Boden	Sandiger Lehm; Lehm mit wechselndem Gehalt an Sanden, Staubsand und Schluff, z. T Geröll führend auf Schotter.
Geländebeschreibung	Nordwestlicher Hangfuß. Wasserlauf 1000 Meter nordwestlich auf gleicher Geländehöhe, bzw. 800 Meter südöstlich jenseits des Geländerrückens.
Erhaltungszustand	Verebnet.
Nutzung aktuell Uraufnahme 1818	Grünland; südöstlicher Bereich unter Wald (nicht prospektiert) Landwirtschaft
Bemerkungen	Eine Römerstraße führt unmittelbar nördlich an der Anlage vorbei – Nachnutzung in römischer Zeit?
Zeitraum der Prospektion	2001
Prospektiert von:	Becker
Literatur	KELLER [1977] 612



Abb. A4: Viereckschanze Baisweil.

Kein BLfD-Luftbild vorhanden. Ersatzweise Orthofoto mit Höhenlinien. Aus dem FIS gespeichert am 20.07.2010. Quelle: Bayerische Vermessungsverwaltung.

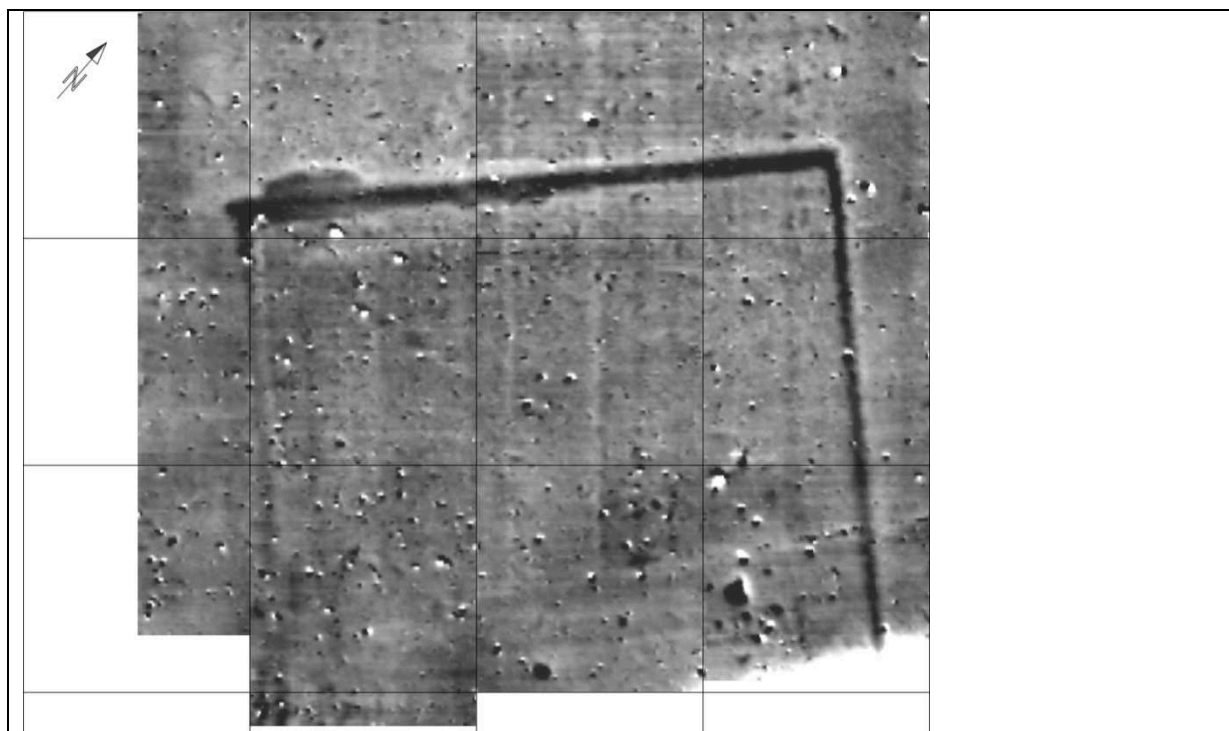


Abb. A5: Viereckschanze Baisweil, Magnetometerprospektion, BS01q_-10_10nT.tif.
Gitterabstand: 40 x 40 Meter. Dynamik: +/- 10 nT. Darstellung im Quadrantenmittel.

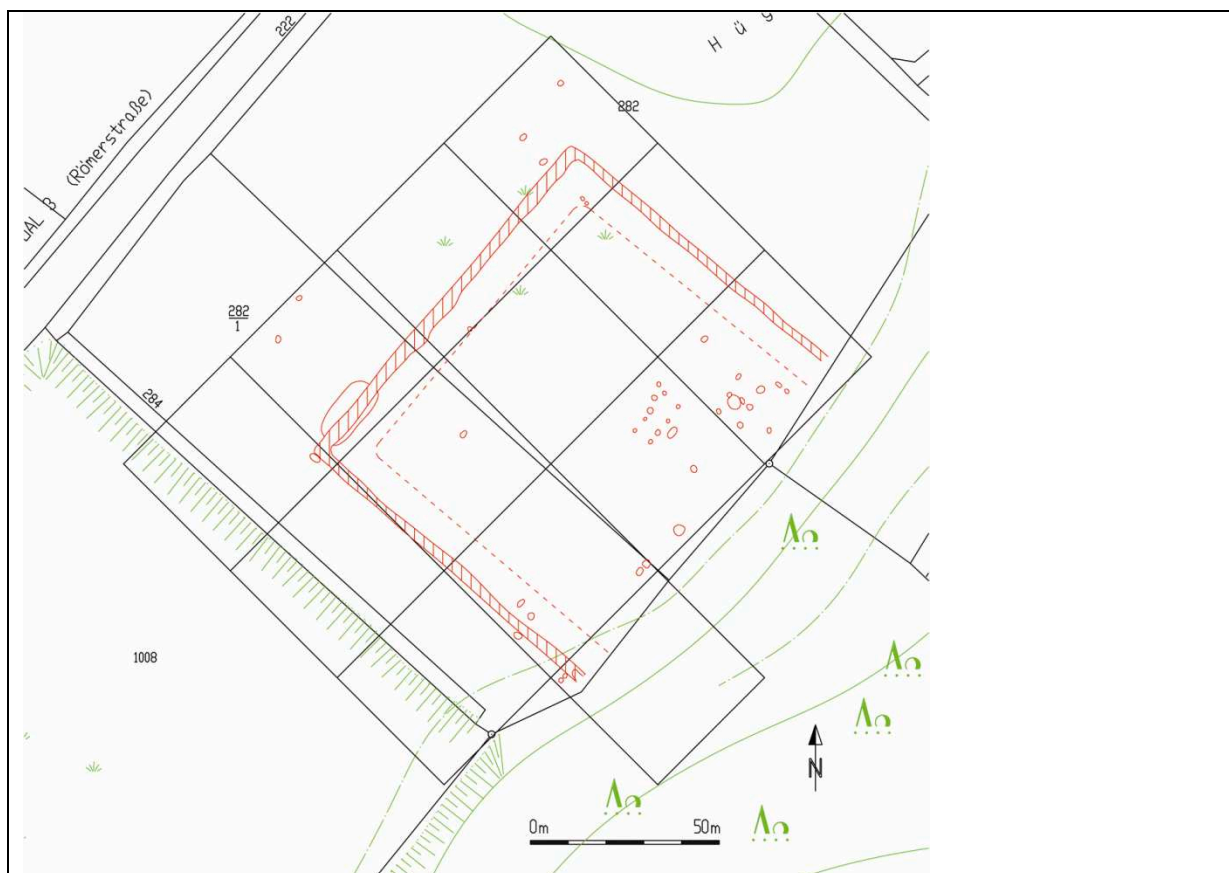
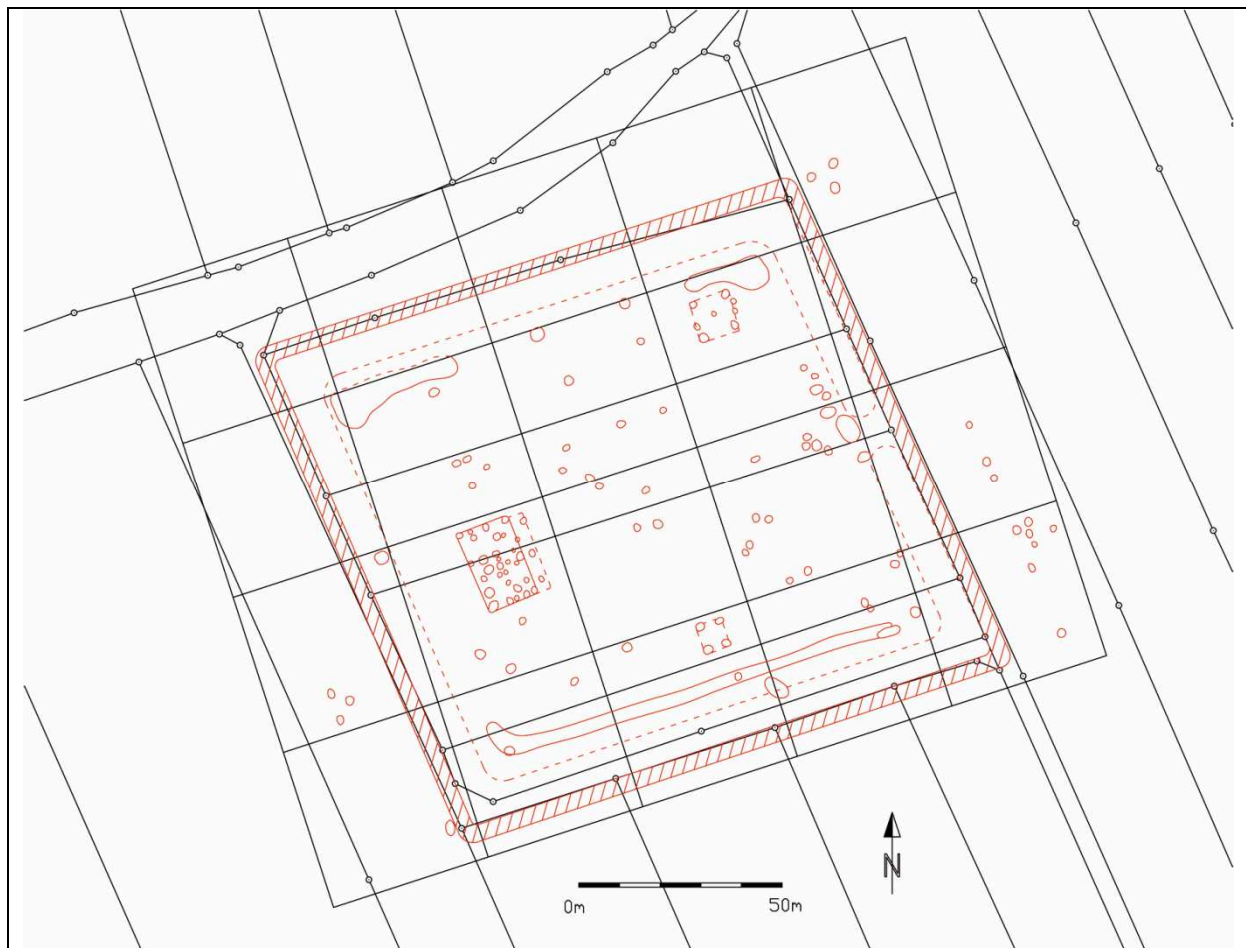
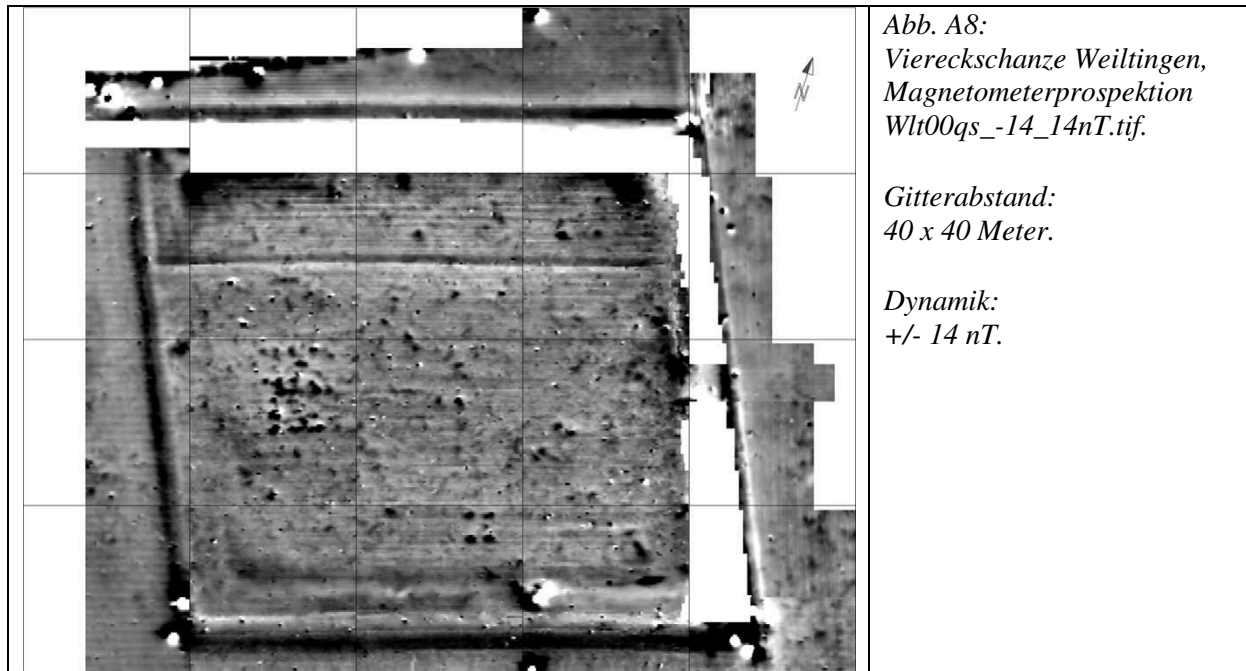


Abb. A6: Viereckschanze Baisweil, Interpretationsplan.

3	Weiltingen
Lage	Mittelfranken, Lkr. Ansbach, Gde. + Gmkg. Weiltingen
BLfD Luftbildnummer	L 6928/293
BLfD Fundstellenummer	D-5-6928-0056 / M-2009-957
Gauß-Krüger-Koord.	4385830, 5433794
Geologie	Albrandregion SW, Unterer Jura (Lias).
Boden	Schwerer bis toniger Lehm, z. T. mit Kalkscherben, z. T. sandig. Tiefgründige Tonböden. Trockenes Gelände.
Geländebeschreibung	Leichter Nordhang; zur 400 Meter entfernten Wörnitz hin abfallend (s. Abb. A7).
Erhaltungszustand	Süd- und Westwall verschleift, als Geländeschwelle sichtbar. Bei Nord- und Ostwall ist die Außenböschung bis auf zwei Meter Höhe erhalten. Gräben verfüllt, im Süden und Westen noch spürbar.
Nutzung aktuell	Landwirtschaft
Uraufnahme (1822)	Landwirtschaft
Bemerkungen	Tor in der Mitte der Ostseite.
Zeitraum der Prospektion	2000
Prospektiert von:	Becker
Literatur	SCHWARZ [1959 / 2007] Bl. 94 – BECKER [2001]



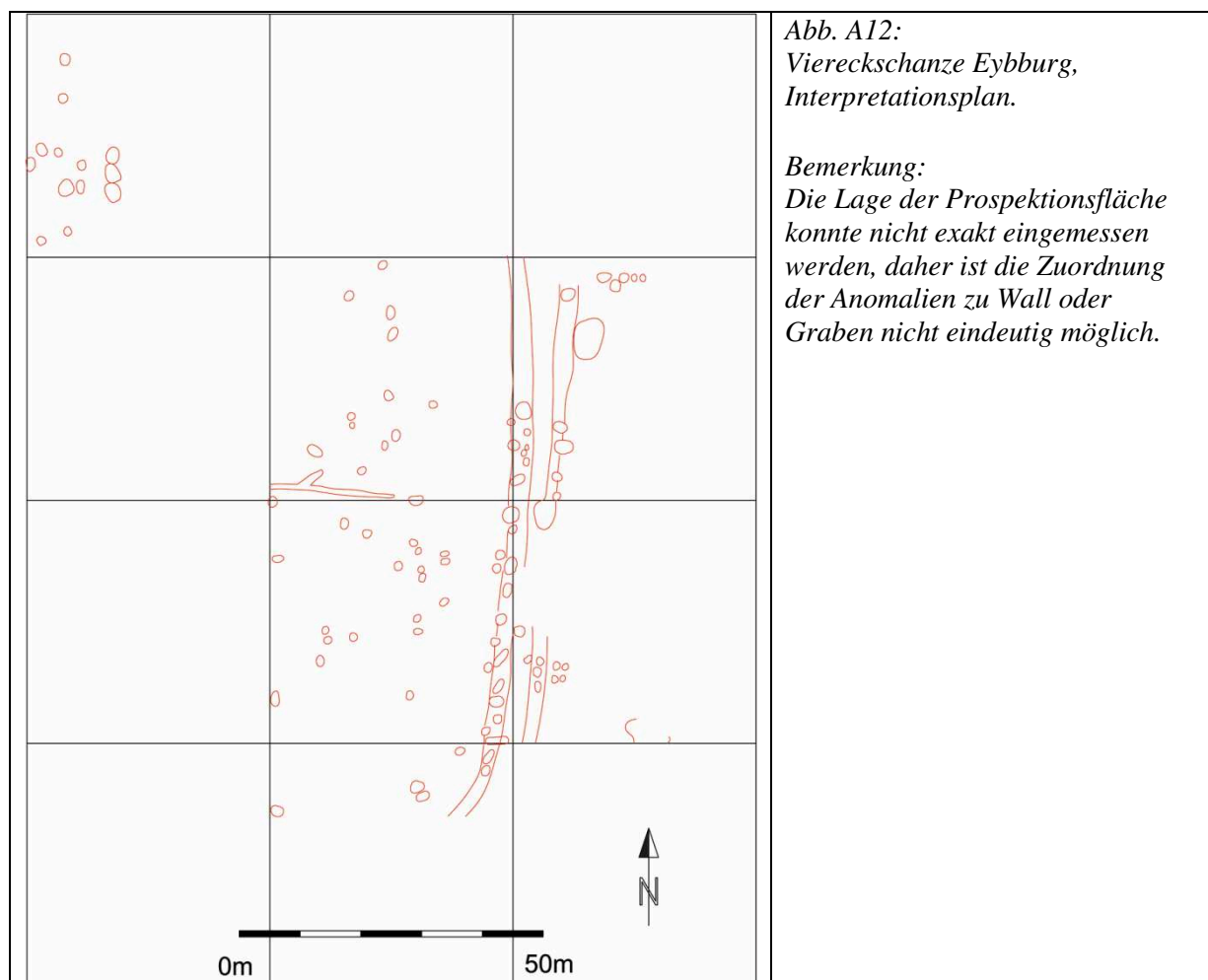
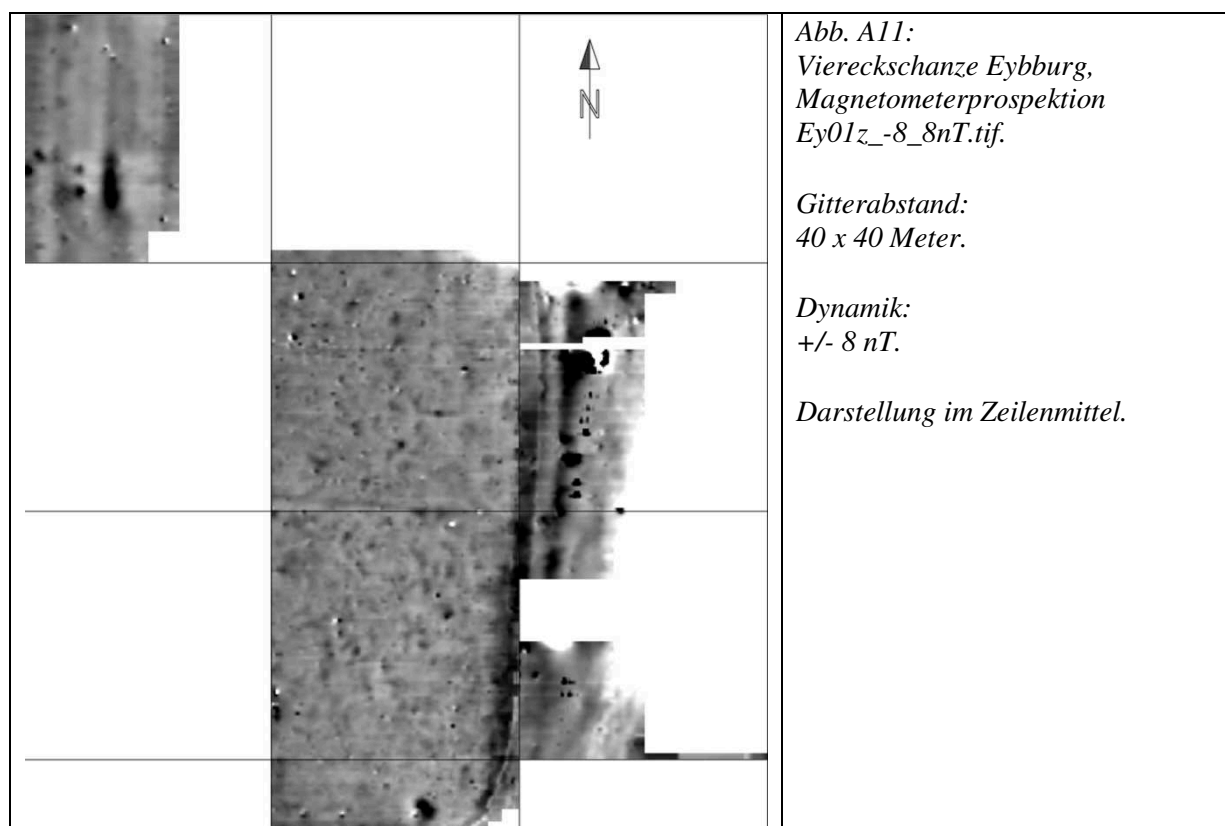
Abb. A7: Viereckschanze Weiltingen, BLfD Luftbild Nr.6928_293_1106_12 vom 01.12.1980, Fotograf: O. Braasch. Blickrichtung von Norden.



4	Eybburg
Lage	Mittelfranken, Lkr. Ansbach, Gde. Arberg, Gmkg. Kleinellenfeld
BLfD Luftbildnummer	L 6928/054
BLfD Fundstellenummer	D-5-6829-0038
Gauß-Krüger-Koord.	4399650, 5442060
Geologie	Keuperabdachung SW
Boden	Bodenkarte 1:500.000: Schwerer bis toniger Lehm, z. T. sandig. Meist basenverarmte Böden. Trockenes Gelände.
Geländebeschreibung	Am Westrand eines Geländesporns. Bachlauf etwa 200 Meter südlich, hangabwärts gelegen.
Erhaltungszustand	„1836 noch gut erhalten, Wallhöhen außer im Norden bei 8-10 Fuß.“ Mittlerweile Wälle vollständig verschleift, West- und Südgraben als flache Mulden erhalten.
Nutzung aktuell	Landwirtschaft
Uraufnahme (1825)	Landwirtschaft; im Ostteil Hopfenpflanzungen
Zeitraum der Prospektion	2001
Prospektiert von:	Becker
Literatur	SCHWARZ [1959 / 2007] Bl. 91 – KELLER [1977] 393 – SCHUBMANN [2008]



Abb. A10: Viereckschanze Eybburg, BLfD Luftbild Nr. 6928_054_8364_23 vom 01.04.2001, Fotograf: K. Leidorf. Blickrichtung von Südosten.



5	Laibstadt
Lage	Mittelfranken, Lkr. Roth, Gde. Heideck, Gmkg. Laibstadt
BLfD Luftbildnummer	L 6932/002
BLfD Fundstellenummer	D-5-6932-0002 / M-2009-2811
Gauß-Krüger-Koord.	4436648, 5439739
Geologie	Albrandregion SW. Dogger (Brauner Jura) - Tonstein, Sandstein mit Eisenerzflözen, Mergel- und Kalkstein.
Boden	Schwerer bis toniger Lehm. Pseudogley und Braunerde-Pseudogley aus schluffiger bis lehmiger Deckschicht über lehmiger bis toniger Verwitterung des Dogger. Trocken, in Mulden Wasser stauend.
Geländebeschreibung	Flachwelliges Gelände auf einem kleinen Plateau eines leicht nach Norden und Osten abfallenden Hanges. Bachläufe im südlichen und westlichen Graben der Schanze, Abfluss Richtung Osten.
Erhaltungszustand	Wälle verschleift und verbreitert, bis zu einer Höhe von etwa 1,5 Metern erhalten. Graben im Norden und Osten ganz verfüllt, nur noch spürbar; im Süden und Westen sehr verflacht.
Nutzung aktuell Uraufnahme (1825)	Grünland Grünland
Zeitraum der Prospektion	21.-22.07.2009
Prospektiert von:	Berghausen, Deller, Gorka, Kühne, Linck
Literatur	SCHWARZ [1959 / 2007] Bl. 99 – 900 JAHRE LAIBSTADT [1980] – FLEISCHMANN ET AL. [1987] – BERGHAUSEN [2010b]



Abb. A13: Viereckschanze Laibstadt, BLfD Luftbild Nr. 6932_002_7435_4 vom 24.02.1996, Fotograf: K. Leidorf. Blickrichtung von Nordwesten.

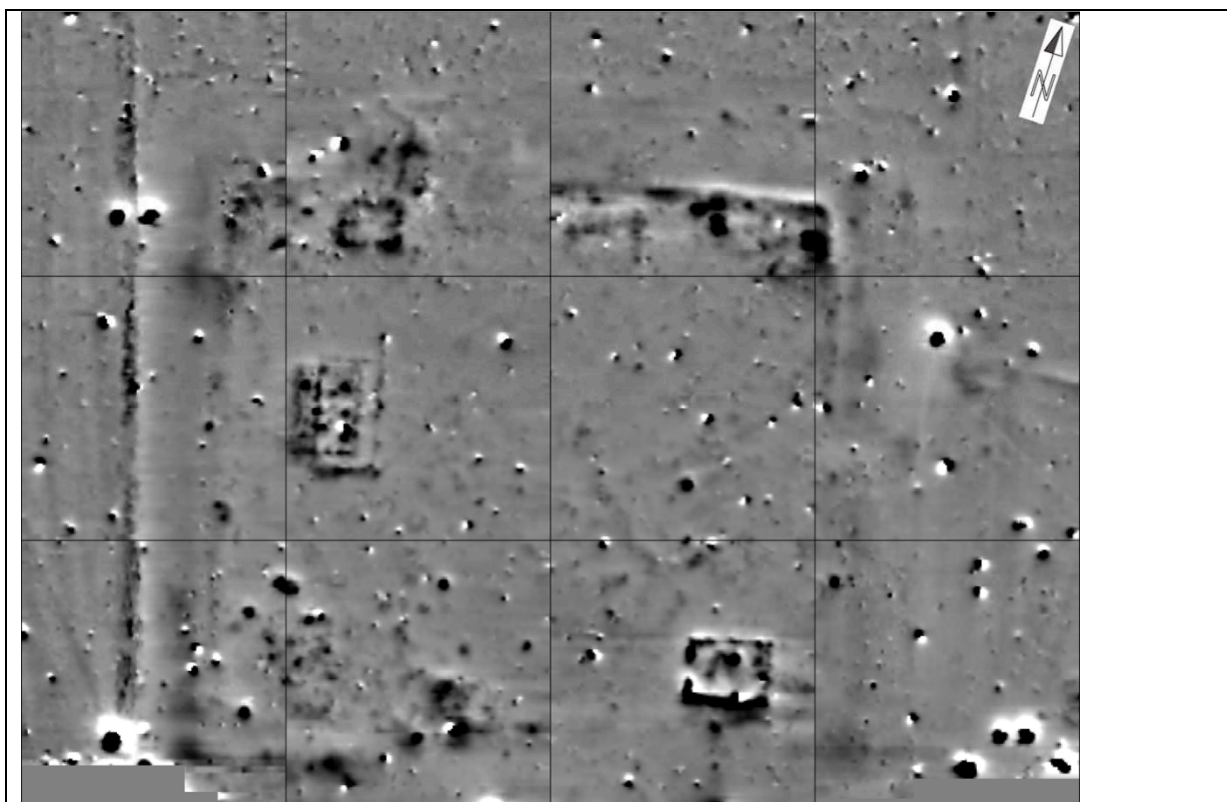


Abb. A14: Viereckschanze Laibstadt, Magnetometerprospektion Lai09az_-8_8nT.tif.
Gitterabstand: 40 x 40 Meter. Dynamik: +/- 8 nT. Darstellung im Zeilenmittel.

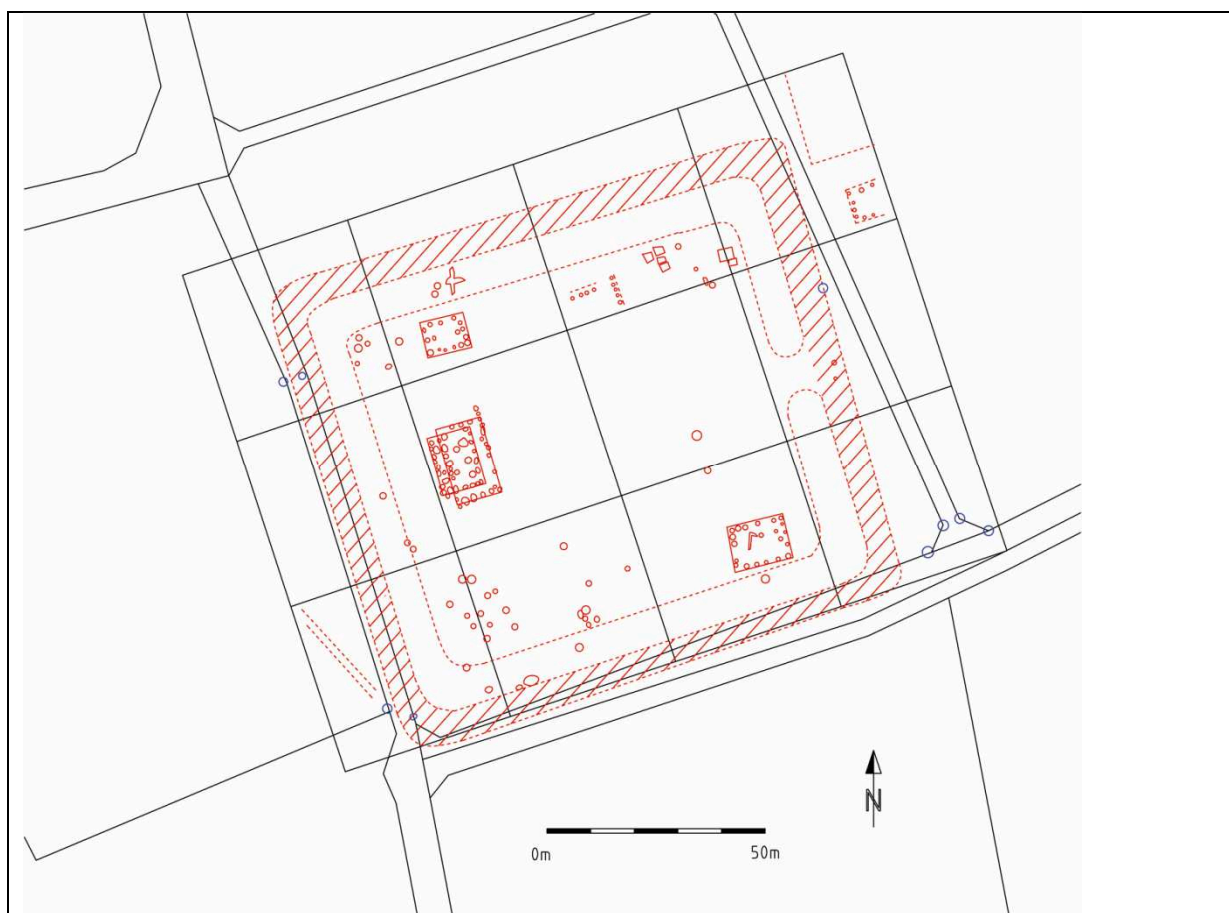


Abb. A15: Viereckschanze Laibstadt, Interpretationsplan.

6	Hechendorf-Güntering
Lage	Oberbayern, Lkr. Starnberg, Gde. Seefeld, Gmkg. Hechendorf am Pilsensee
BLfD Luftbildnummer	L 7932/047-2
BLfD Fundstellenummer	D-1-7933-0217 / M-2009-2927
Gauß-Krüger-Koord.	4440485, 5323731
Geologie	Jungmoräne, Isargletscher.
Boden	Parabraunerden und Braunerden aus schluffig-kiesiger Jungmoräne.
Geländebeschreibung	Auf einer würmeiszeitlichen Moräne, zwischen den Gewässern Wörthsee und Pilsensee; dazwischen mehrere Bachläufe. Auf dem höchsten Punkt einer schwach ausgeprägten Kuppe, Geländeabfall vor allem nach Westen hin, deutliche Abbruchkante (Neigung etwa 35°) bei der Westecke der Viereckschanze.
Erhaltungszustand	Verebnet.
Nutzung aktuell	Landwirtschaft; Westecke (am Abhang): Grünland
Uraufnahme (1809)	Landwirtschaft
Renovation (1863)	Landwirtschaft
Zeitraum der Prospektion	01.09.2009
Prospektiert von:	Berghausen, Deller, Gorka, Linck
Literatur	BERGHAUSEN [2010c] – KAINDL [2010]

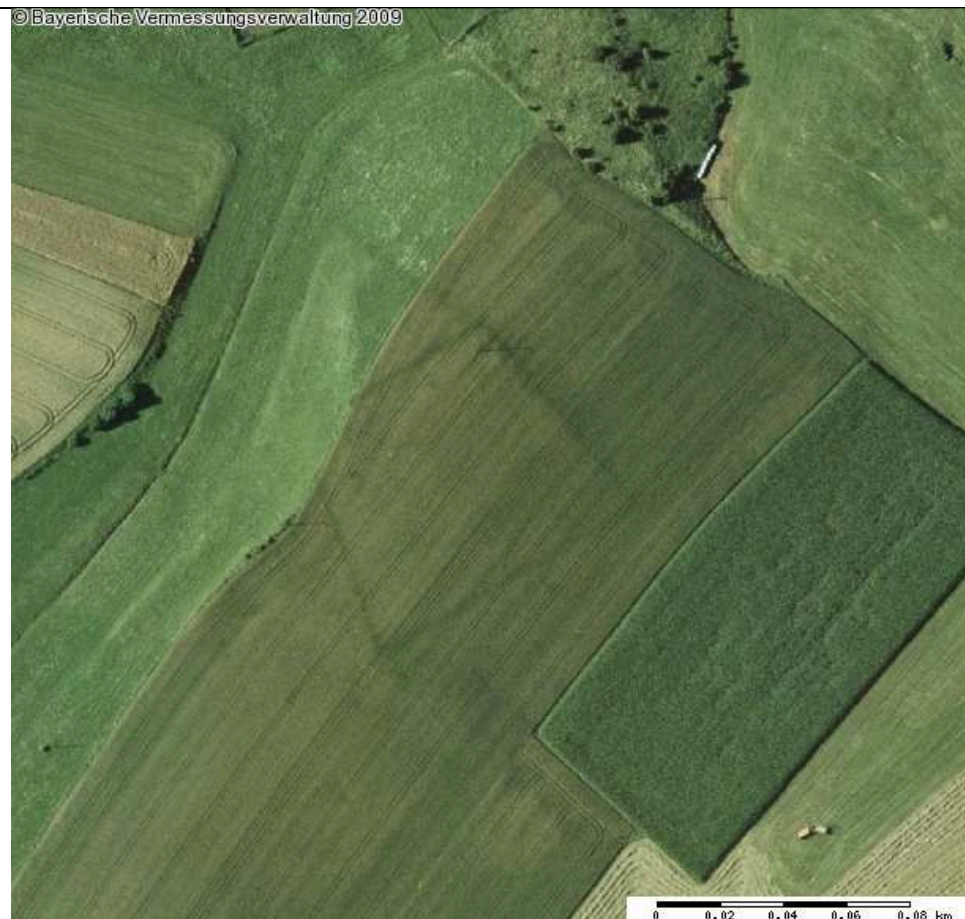


Abb. A16: Viereckschanze Hechendorf-Güntering. BLfD Luftbild nicht vorhanden. Ersatzweise FIS-Bild vom 30.04.2009. Quelle: Bayerische Vermessungsverwaltung.

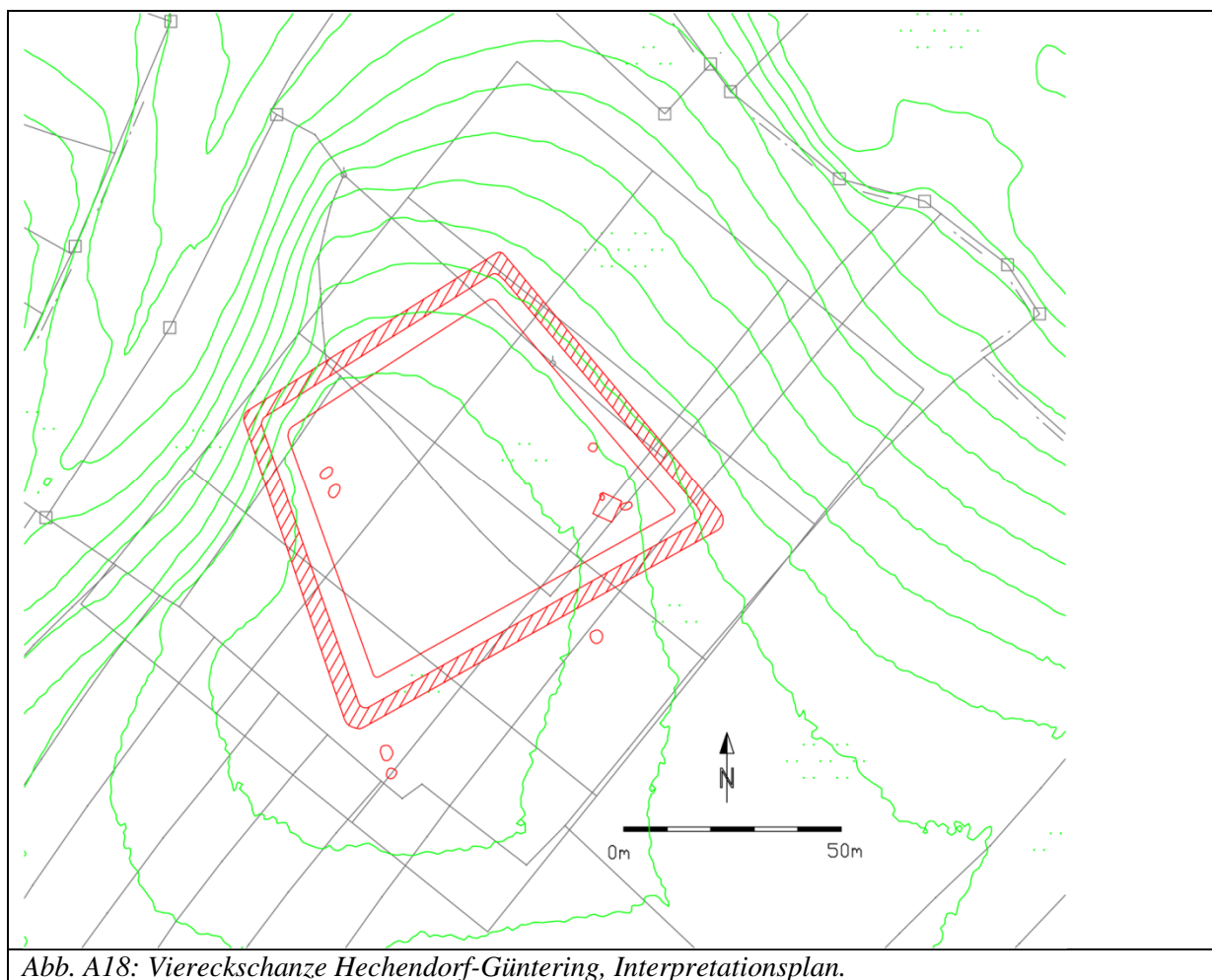
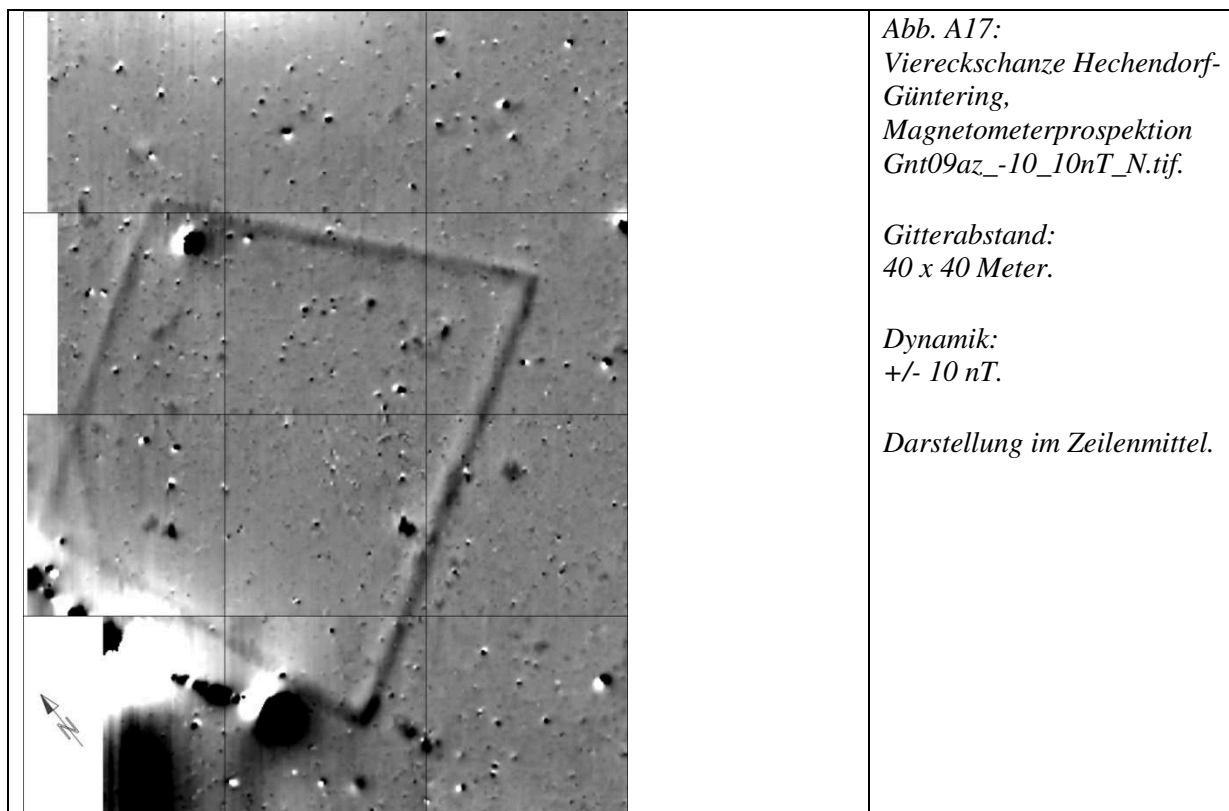


Abb. A18: Viereckschanze Hechendorf-Güntering, Interpretationsplan.

7	Egweil
Lage	Oberbayern, Lkr. Eichstätt, Gde. + Gmkg. Egweil
BLfD Luftbildnummer	L 7332/156-2
BLfD Fundstellenummer	D-1-7233-0207
Gauß-Krüger-Koord.	4445484, 5405555
Geologie	Donaualb. Obere Süßwassermolasse, ungegliedert - Ton, Schluff, Mergel, Sand.
Boden	Überwiegend Braunerden aus kiesig-lehmigem und sandigem Molassematerial, z.T. mit lehmiger Fließerdedecke.
Geländebeschreibung	Höchster Punkt bis Nordosthang einer leichten Geländekuppe. Wasserläufe je 600 Meter nördlich und südöstlich, hangabwärts gelegen.
Erhaltungszustand	Verebnet.
Nutzung aktuell	Landwirtschaft
Uraufnahme 1813	Landwirtschaft
Zeitraum der Prospektion	1996
Prospektiert von:	Faßbinder
Literatur	FABBINDER & IRLINGER [1999B] – FABBINDER [2004] – FABBINDER [2005]



*Abb. A19:
Viereckschanze Egweil,
BLfD Luftbild Nr.
7332_156_3162_34 vom
14.07.1983,
Fotograf: O. Braasch.
Blickrichtung von Norden.*

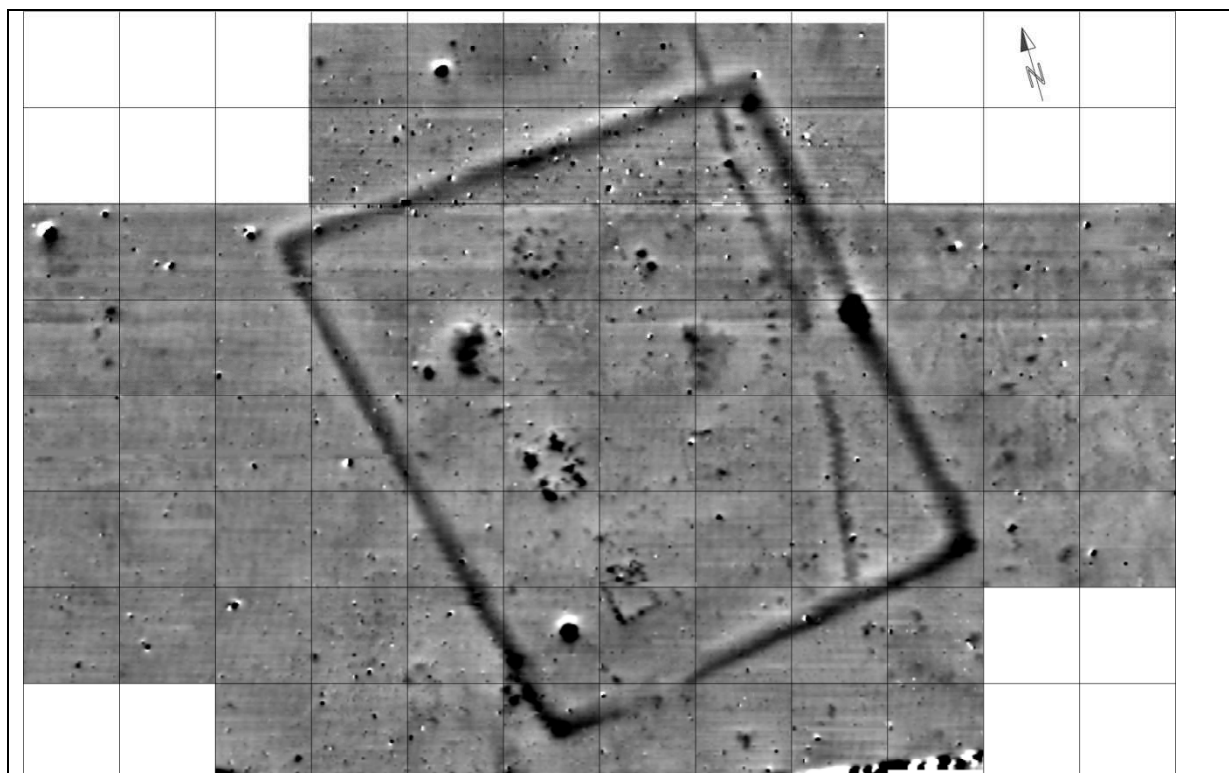


Abb. A20: Viereckschanze Egweil, Magnetometerprospektion Egw96d_-8_8nT.tif.
Gitterabstand: 20 x 20 Meter. Dynamik: +/- 8nT.



Abb. A21: Viereckschanze Egweil, Interpretationsplan.

8	Aubing / Mooschwaige
Lage	Oberbayern, München (Stadt), Gde. München, Gmkg. Aubing
BLfD Luftbildnummer	L 7934/178-2
Fundstelle / Maßnahme Nr.	Nicht vorhanden
Gauß-Krüger-Koord.	4454855, 5335295
Geologie	Münchener Schotterebene. Würmzeitliche Schotter.
Boden	Ackerpararendzinen, Braunerde und Parabraunerde, aus carbonatreichem Schotter, mit flacher Flußmergel- oder Hochflutlehmüberdeckung.
Geländebeschreibung	Nahezu ebenes Gelände. Bachlauf 400 Meter in westlicher Richtung, auf gleicher Geländehöhe.
Erhaltungszustand	Verebnet.
Nutzung aktuell	Landwirtschaft; Nordwall und -graben vermutlich unter Wald
Uraufnahme 1809	Wald
Renovation 1859	Landwirtschaft
Zeitraum der Prospektion	28.04.2009
Prospektiert von:	Berghausen, Deller
Literatur	LEIDORF [2008]



Abb. A22: Viereckschanze Aubing, BLfD Luftbild Nr. 7934_178_8999_30 vom 14.04.2007, Fotograf: K. Leidorf. Blickrichtung von Südwesten.

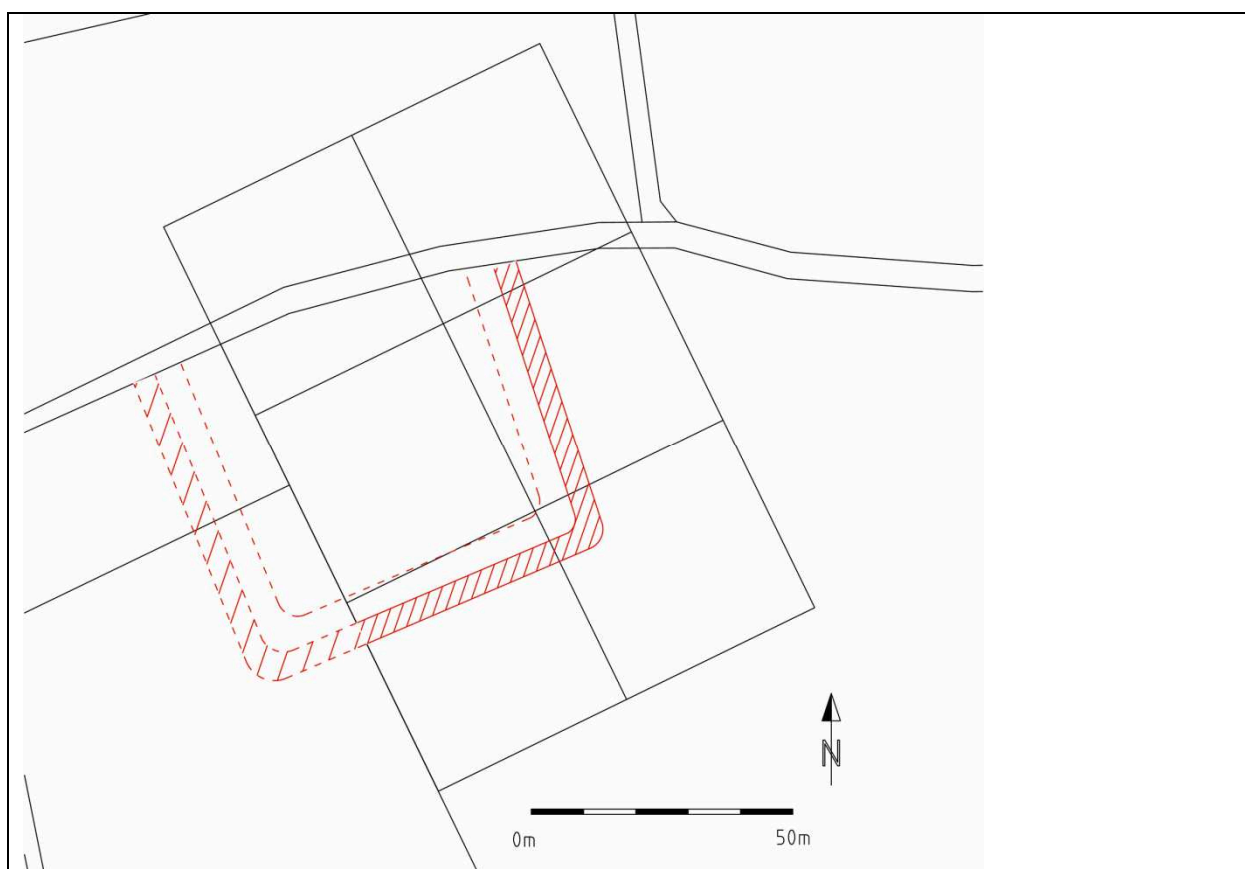
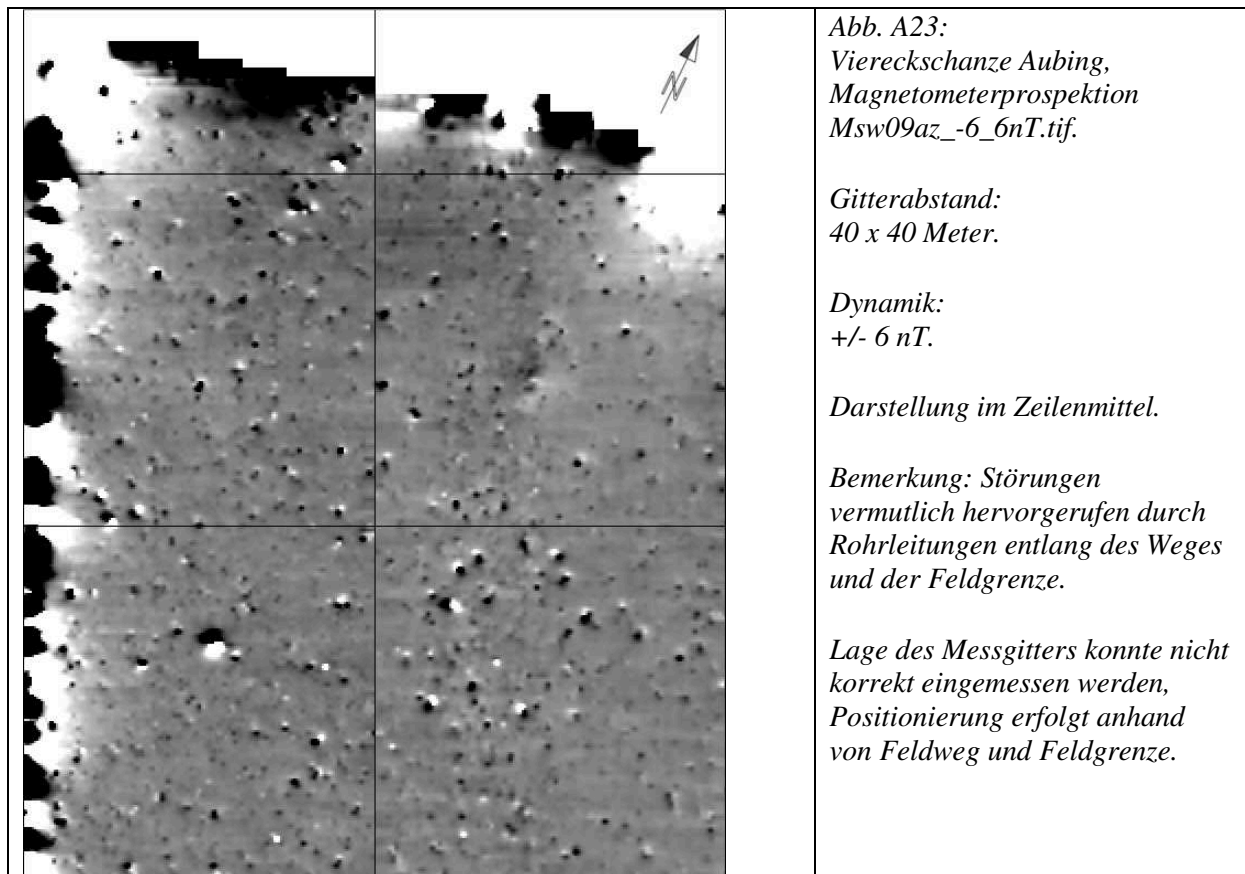
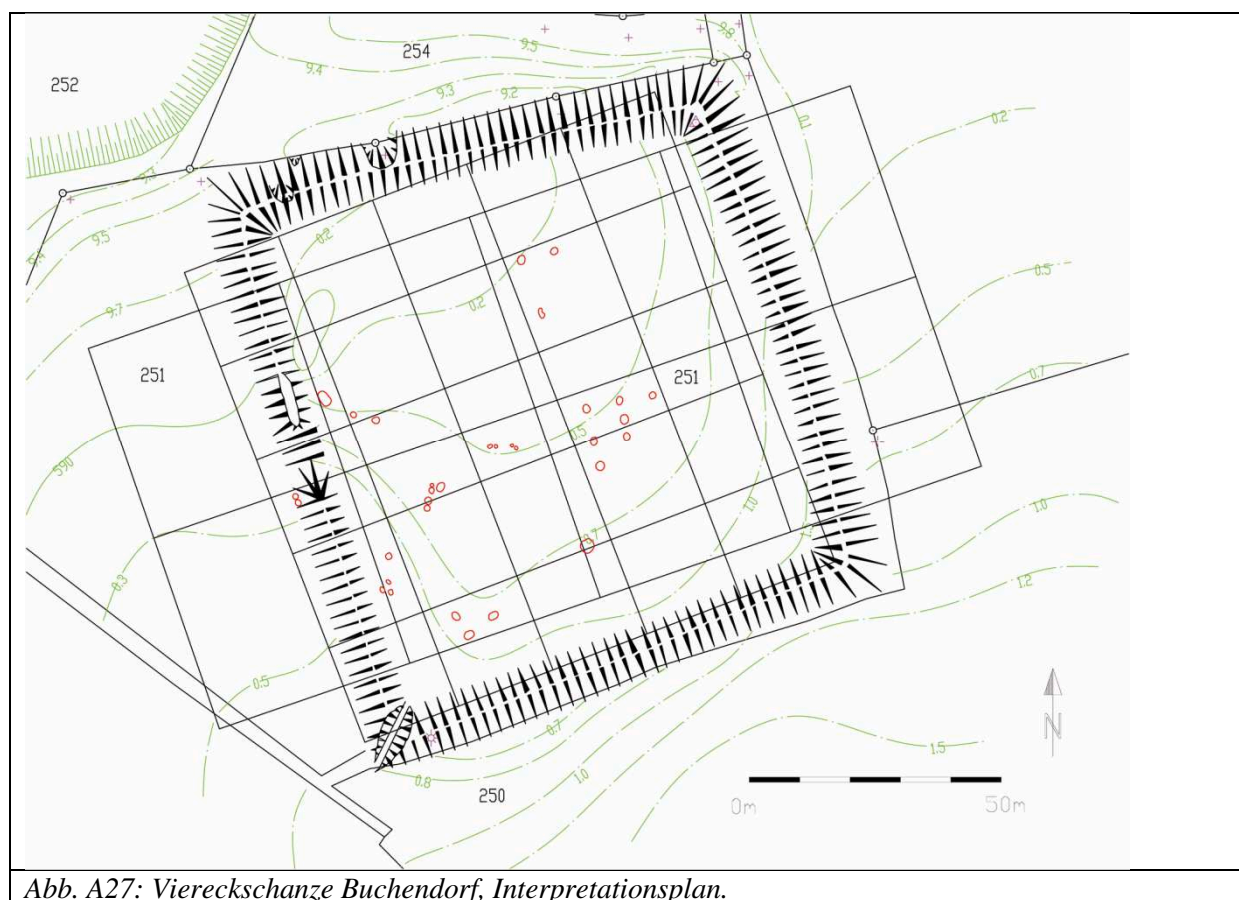
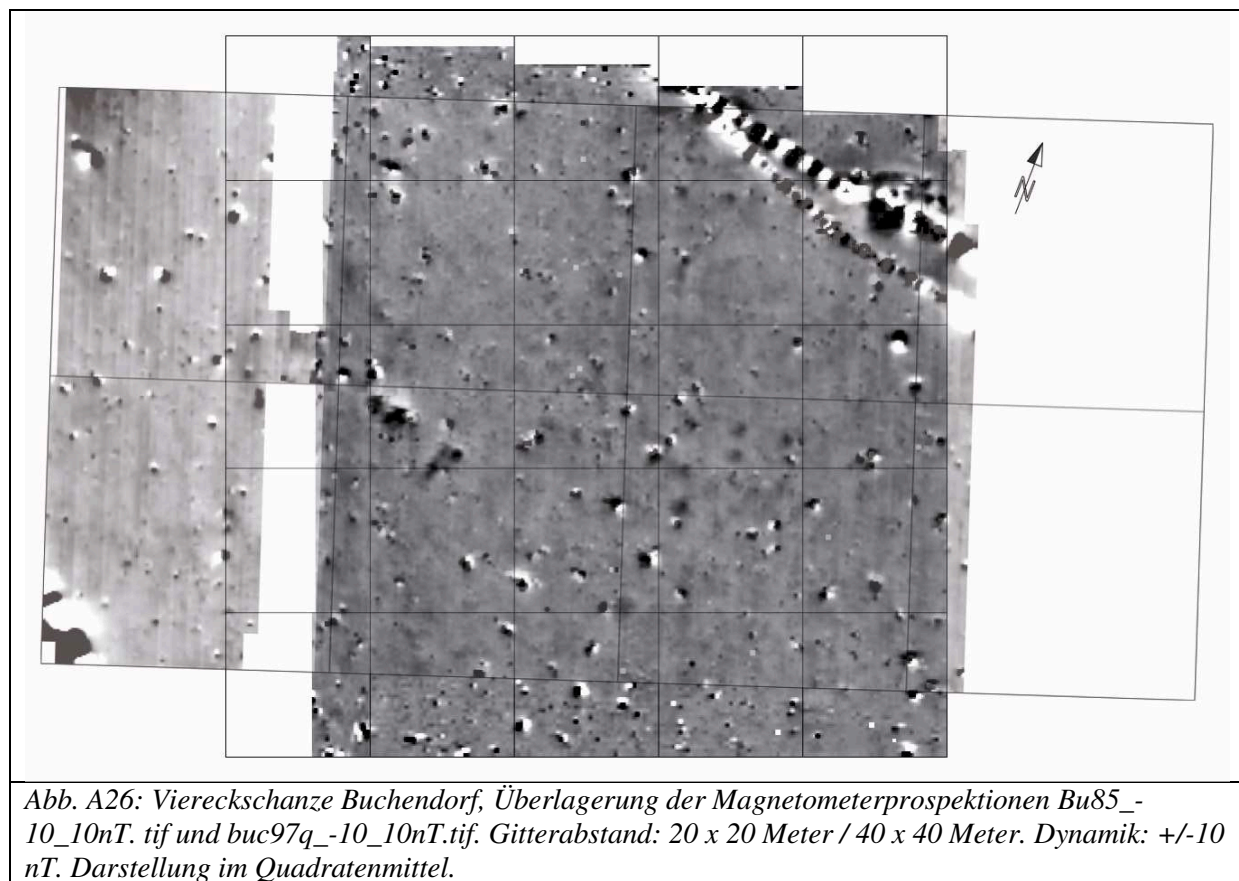


Abb. A24: Viereckschanze Aubing, Interpretationsplan.
Die Interpretation der Lage von Wall und Graben beruht auf der Luftbildaufnahme.

9	Buchendorf
Lage	Oberbayern, Lkr. Starnberg, Gde. Gauting, Gmkg. Buchendorf
BLfD Luftbildnummer	L 7934/001
Fundstelle / Maßnahme Nr.	D-1-7934-0013 / M-2009-1105
Gauß-Krüger-Koord.	4456120, 5324885
Geologie	Münchener Schotterebene. Lößlehm auf Altmoräne und Hochterrassenschotter.
Boden	Lehm, z. T. steinig; Braunerden aus Lößlehm über Lößlehm-Fließerde.
Geländebeschreibung	Fast eben, nur leichte Neigung nach Nordwesten. Kleines Gewässer 250 Meter entfernt in westlicher Richtung, hangabwärts gelegen.
Erhaltungszustand	Wälle noch gut erhalten, Höhe bis über 2 Meter. Gräben weitgehend verfüllt, nur Ostgraben noch sichtbar.
Nutzung aktuell	Grünland
Uraufnahme 1809	Landwirtschaft
Renovation 1859	Landwirtschaft
Zeitraum der Prospektion	1985/97
Prospektiert von:	Becker
Literatur	WEBER [1909/10] – SCHWARZ [1959 / 2007] Bl. 31 – SCHWARZ [1960] – RGZM [1971] – SCHWARZ [1975] – IRLINGER [1996b] – KELLER [1977]



Abb. A25: Viereckschanze Buchendorf, BLfD Luftbild Nr. 7934_001_8878_35 vom 21.11.2004, Fotograf: K. Leidorf. Blickrichtung von Süden.



10	Neufahrn
Lage	Oberbayern, Lkr. Bad Tölz-Wolfratshausen, Gde. Egling, Gmkg. Neufahrn
BLfD Luftbildnummer	L 8134/006
BLfD Fundstellenummer	D-1-8034-0014 / M-2009-1127
Gauß-Krüger-Koord.	4460887, 5307818
Geologie	Jungmoräne, Isargletscher.
Boden	Sandiger Lehm; Braunerden. Trockenes Gelände.
Geländebeschreibung	Am schwach ausgeprägten Nordhang einer leichten Geländekuppe. Bachlauf 400 Meter westlich, jenseits eines kleinen Geländerückens.
Erhaltungszustand	Wälle teilweise bis 4 Meter (von außen) bzw. bis 2,5 Meter (von innen) erhalten. Westgraben bis 2,5 Meter Tiefe erhalten, übrige Gräben verfüllt.
Nutzung aktuell	Landwirtschaft
Uraufnahme (1811)	Landwirtschaft
Renovation (1864)	Landwirtschaft
Bemerkungen	Auffällige Größe von etwa 180 x 120 Metern.
Zeitraum der Prospektion	1993/94
Prospektiert von:	Becker, Faßbinder
Literatur	WEBER [1909/10] – BVGB [1956] – SCHWARZ [1959 / 2007] Bl. 43 – BECKER [1994] – RGZM [1971] – KELLER [1977]

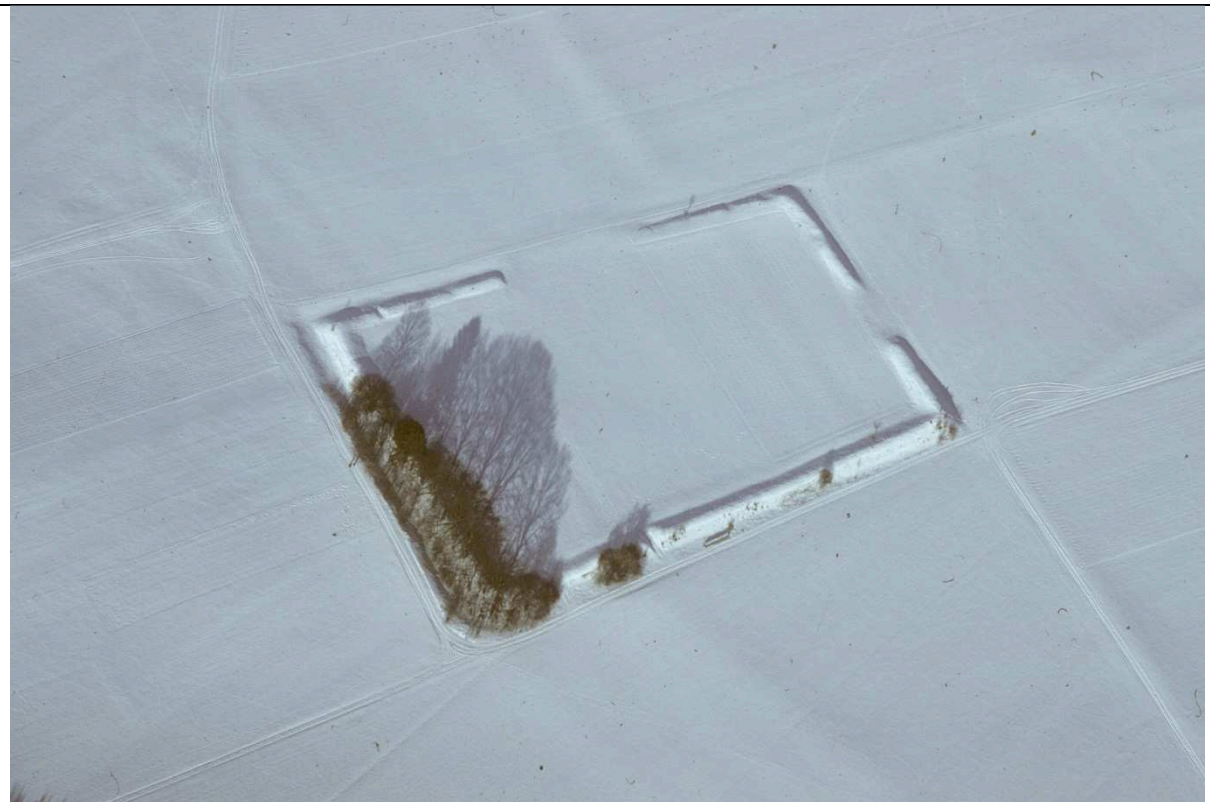
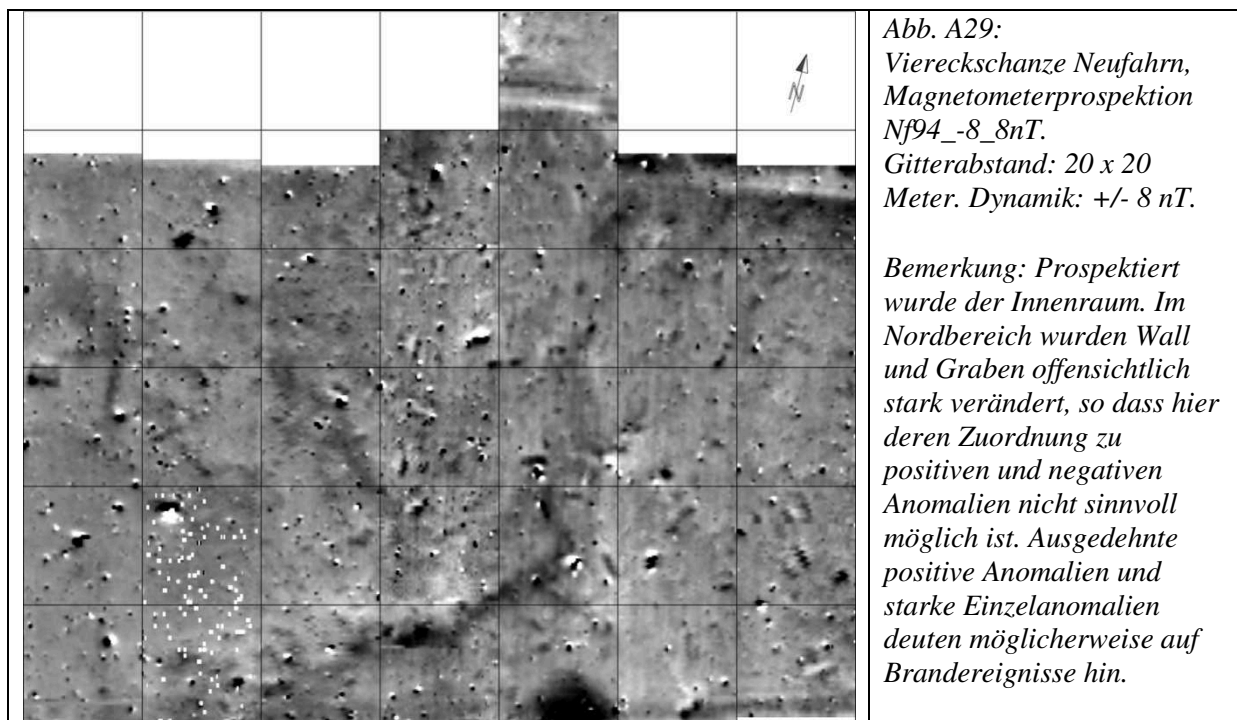


Abb. A28: Viereckschanze Neufahrn, BLfD Luftbild Nr. 8134_006_4778_36 vom 02.02.1987, Fotograf: O. Braasch. Blickrichtung von Süden.



11	Manching
Lage	Oberbayern, Lkr. Pfaffenhofen an der Ilm, Gde. Manching, Gmkg. Westenhausen
BLfD Luftbildnummer	L 7334/060-3
BLfD Fundstellenummer	D-1-7235-0348
Gauß-Krüger-Koord.	4465180, 5398620
Geologie	Donaumoos. Schotter, alt- bis mittelholozän - Kies, sandig.
Boden	Kalkgley, örtlich tiefreichend humos, aus Flussmergel über carbonatreichem Schotter, teilweise aus carbonathaltigen Tal- und Bachsedimenten.
Geländebeschreibung	Nahezu eben. Mehrere kleine Seen in der nahen Umgebung.
Erhaltungszustand	Verebnet.
Nutzung aktuell	Landwirtschaft
Uraufnahme (1813)	Landwirtschaft
Bemerkungen	Lage etwa 200 Meter östlich des keltischen Oppidums.
Zeitraum der Prospektion	14.09.2010
Prospektiert von:	F. Becker, Deller, Faßbinder
Literatur	---

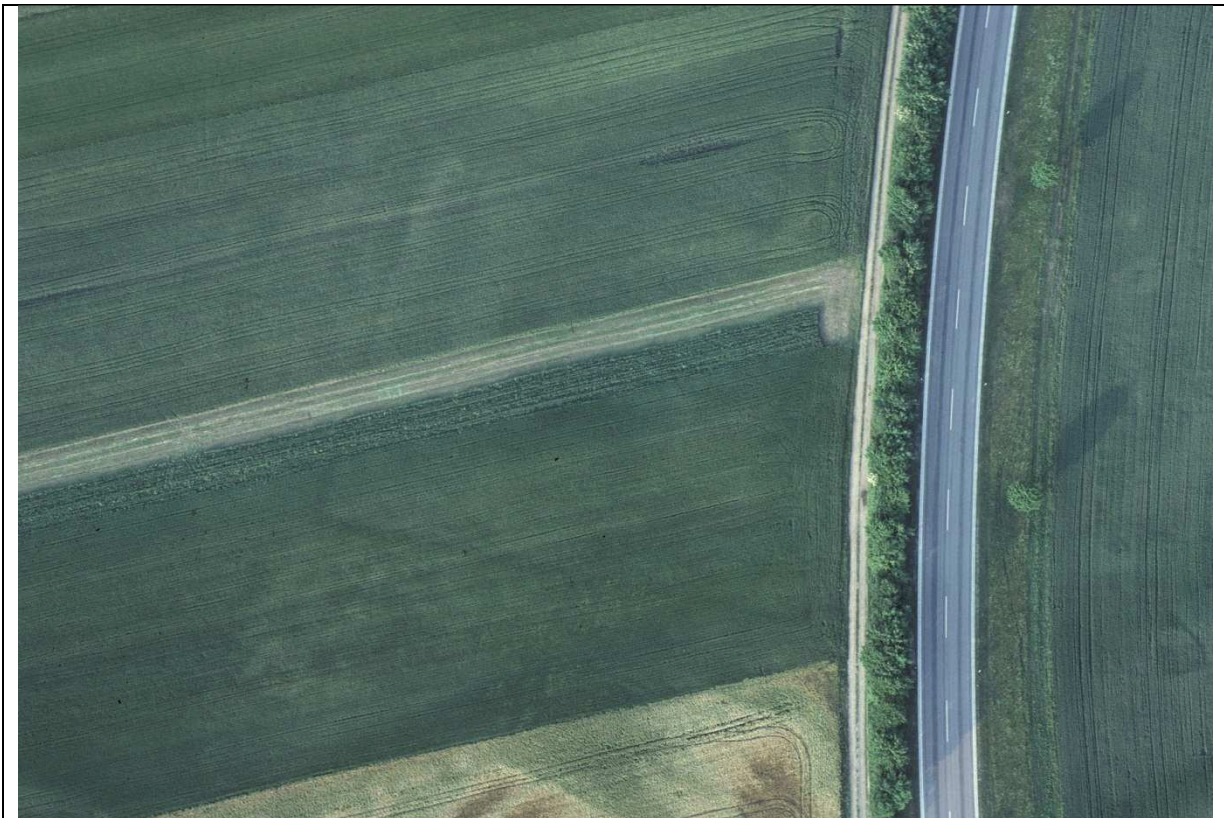
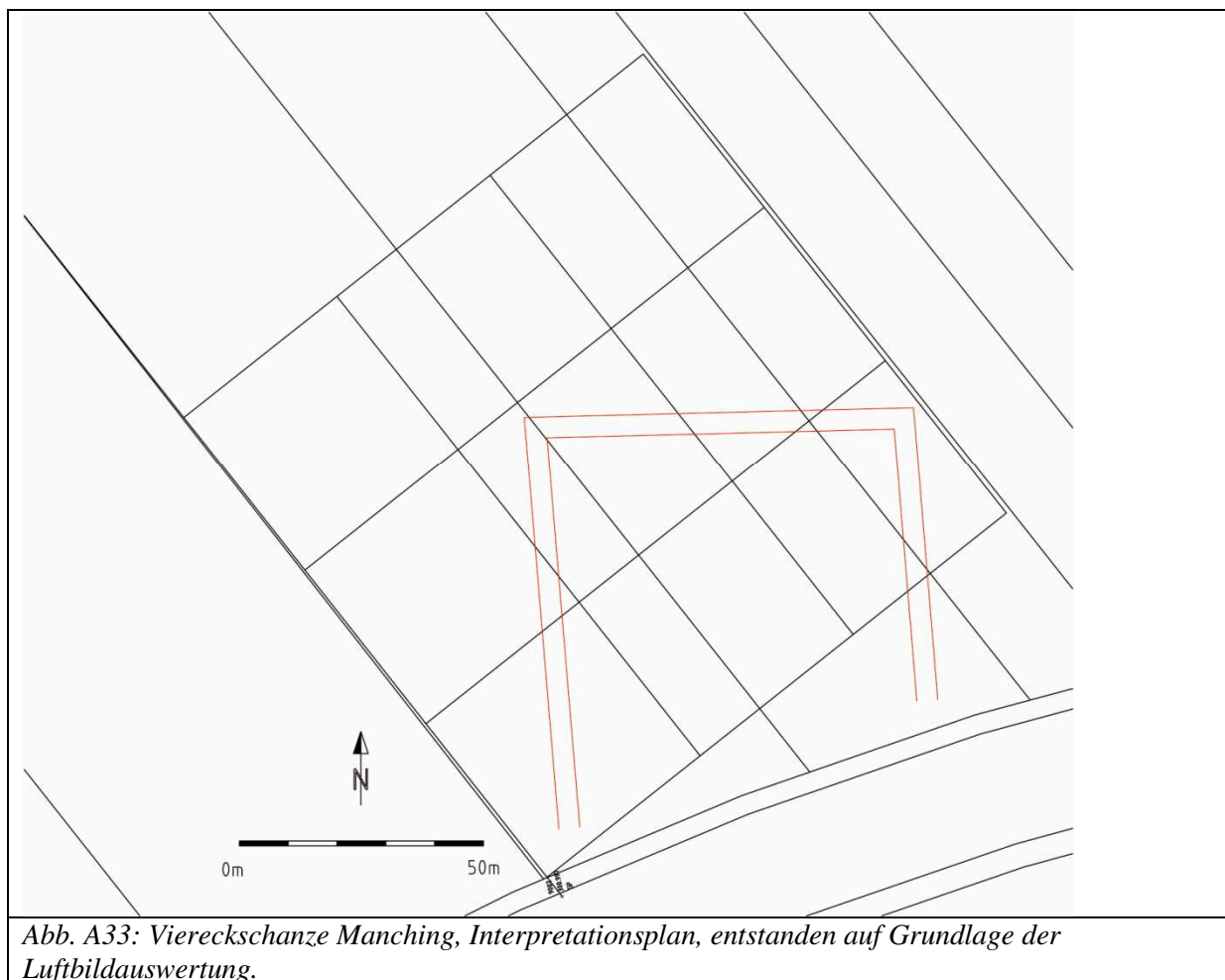
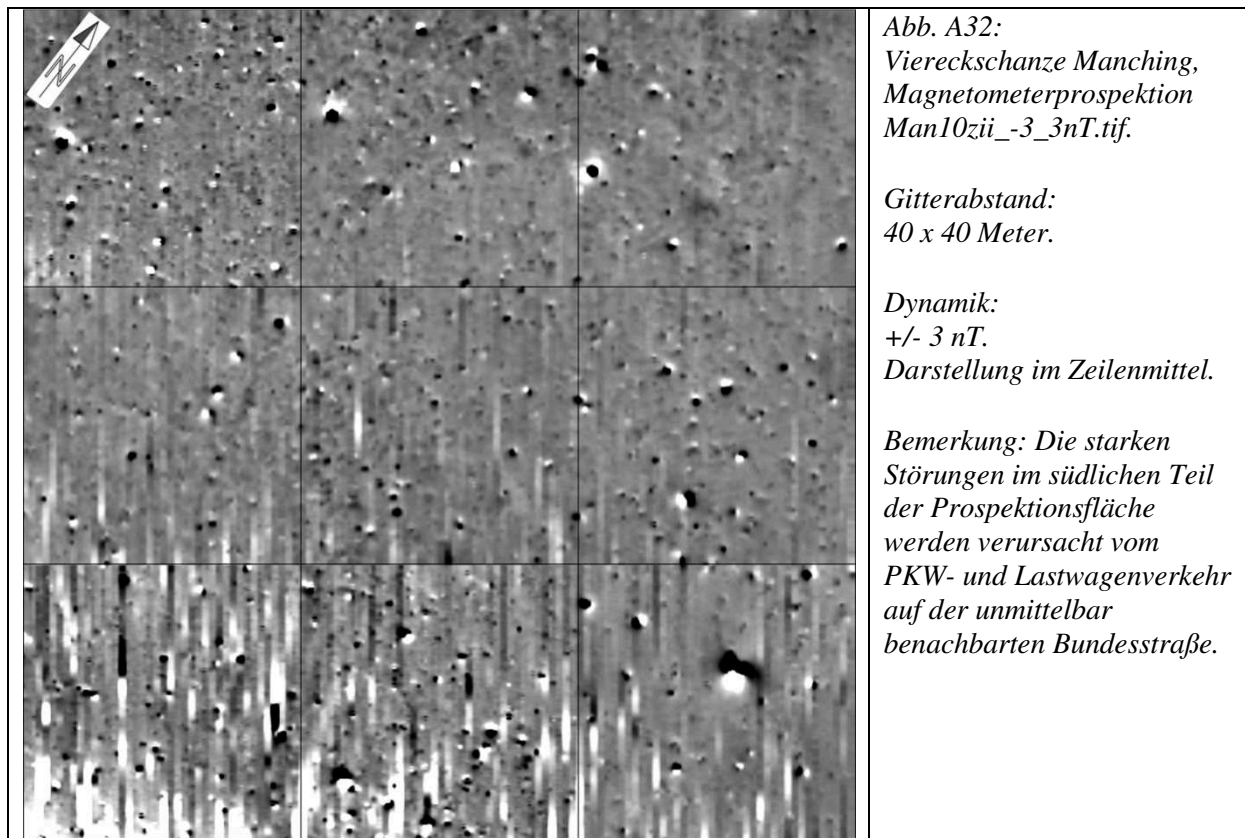


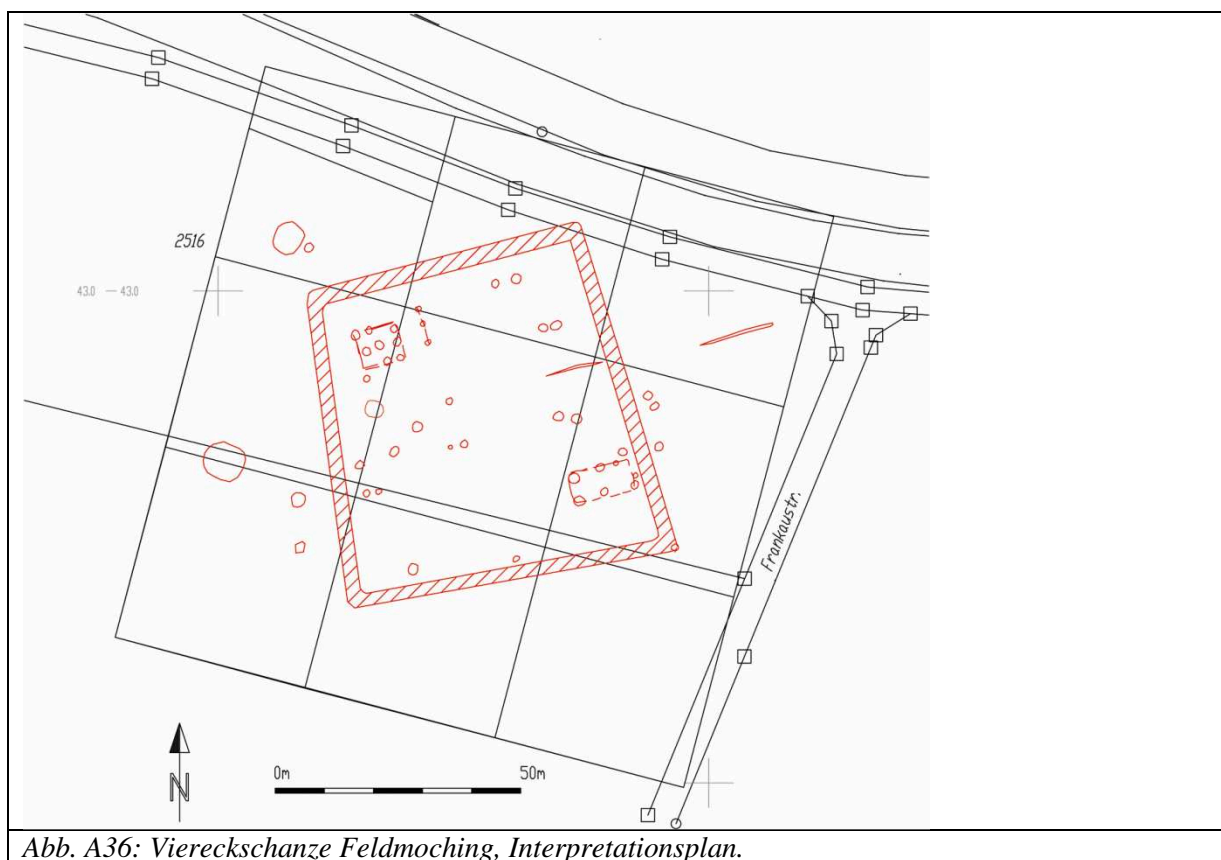
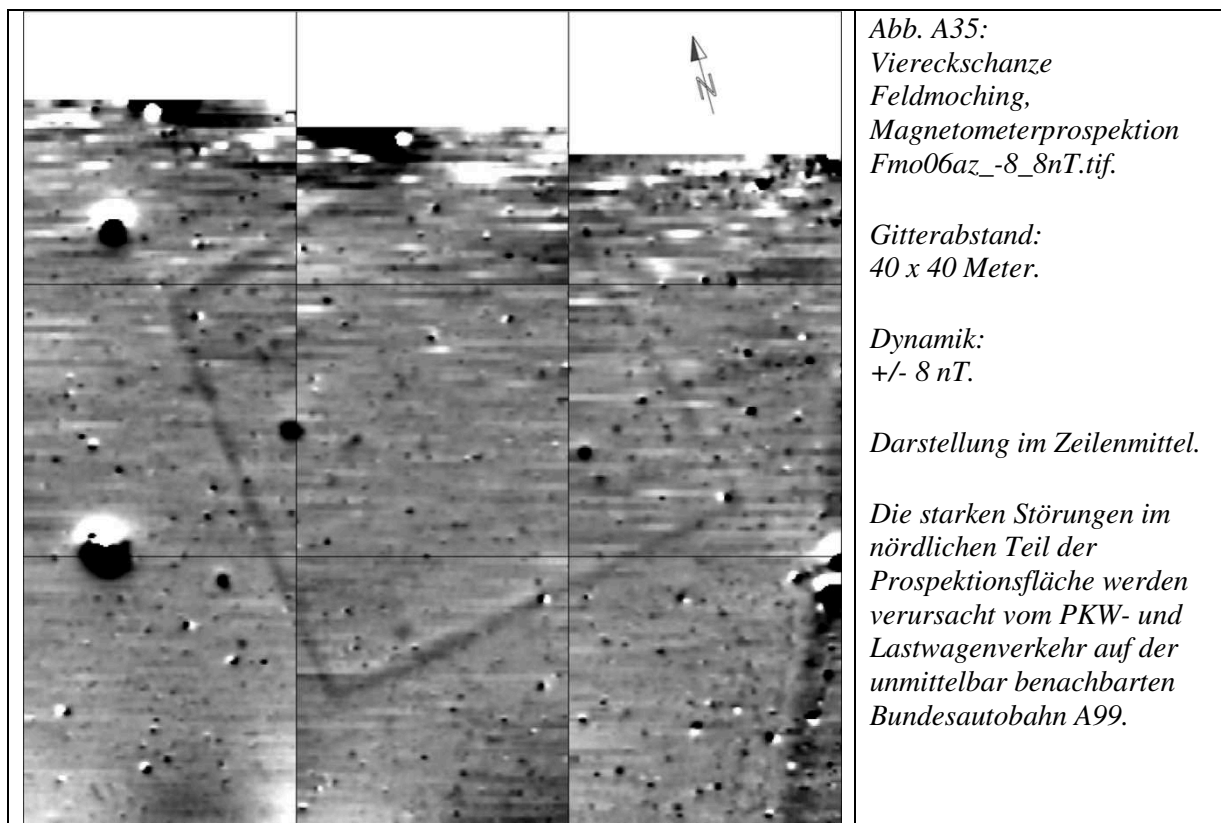
Abb. A31: Viereckschanze Manching, BLfD Luftbild Nr. 7334_060-3_2324a_23 vom 15.06.1982, Fotograf: O. Braasch. Blickrichtung von Westen.



12	Feldmoching
Lage	Oberbayern, München (Stadt), Gde. München, Gmkg. Feldmoching
BLfD Luftbildnummer	L 7734/104-1
BLfD Fundstellenummer	D-1-7735-0114 / M-2009-1087
Gauß-Krüger-Koord.	4465656, 5342978
Geologie	Münchener Schotterebene. Würmzeitliche Schotter; Kies, sandig.
Boden	Ackerpararendzinen aus carbonatreichem Schotter, meist mit flacher Flußmergel- oder Hochflutlehmüberdeckung.
Geländebeschreibung	Eben. Heutiger Bachlauf 600 Meter westlich; Gelände wegen Stadtrandlage und Bundesautobahn baulich stark verändert.
Erhaltungszustand	Verebnet.
Nutzung aktuell	Landwirtschaft
Uraufnahme (1809)	Landwirtschaft
Renovation (1859)	Landwirtschaft
Zeitraum der Prospektion	01.-02.08.2006
Prospektiert von:	Faßbinder
Literatur	IRLINGER [1996b] – FAßBINDER & GORKA [2007]



Abb. A34: Viereckschanze Feldmoching, BLfD Luftbild Nr. 7734_104_4005_22 vom 03.07.1985, Fotograf: O. Braasch. Blickrichtung von Südwesten.



13	Holzhausen „Schanze 2“
Lage	Oberbayern, Lkr. München, Gde. Straßlach-Dingharting, Gmkg. Dingharting
BLfD Luftbildnummer	L 8134/002
BLfD Fundstellenummer	D-1-8035-0021
Gauß-Krüger-Koord.	4465782, 5313545
Geologie	Jungmoräne (würmzeitlich) mit Endmoränenzügen, z.T. mit Vorstoßschotter - Kies, sandig bis tonig-schluffig.
Boden	Lehmboden mit Kiesuntergrund; Braunerden.
Geländebeschreibung	Nahezu eben; sehr leichte Geländeneigung nach Nordosten. Westlich der Schanze Quellpunkte in 300-400 Metern Entfernung, hangaufwärts gelegen.
Erhaltungszustand	Wälle bis etwa 2 Meter Höhe erhalten. Gräben verfüllt, Verlauf noch spürbar.
Nutzung aktuell	Grünland / Pferdekoppel
Uraufnahme (1811)	Landwirtschaft
Renovation (1864)	Landwirtschaft; Nordteil Grünland
Bemerkungen	Ausgrabung durch K. Schwarz 1957-59 („Holzhausen Schanze 2“). Wallmaterial: Kies.
Zeitraum der Prospektion	1997
Prospektiert von:	Becker
Literatur	SCHWARZ [1959 / 2007] Bl. 41 – SCHWARZ [1960] – RGZM [1971] – SCHWARZ [1975] – SCHWARZ & WIELAND [2005] – KELLER [1977]

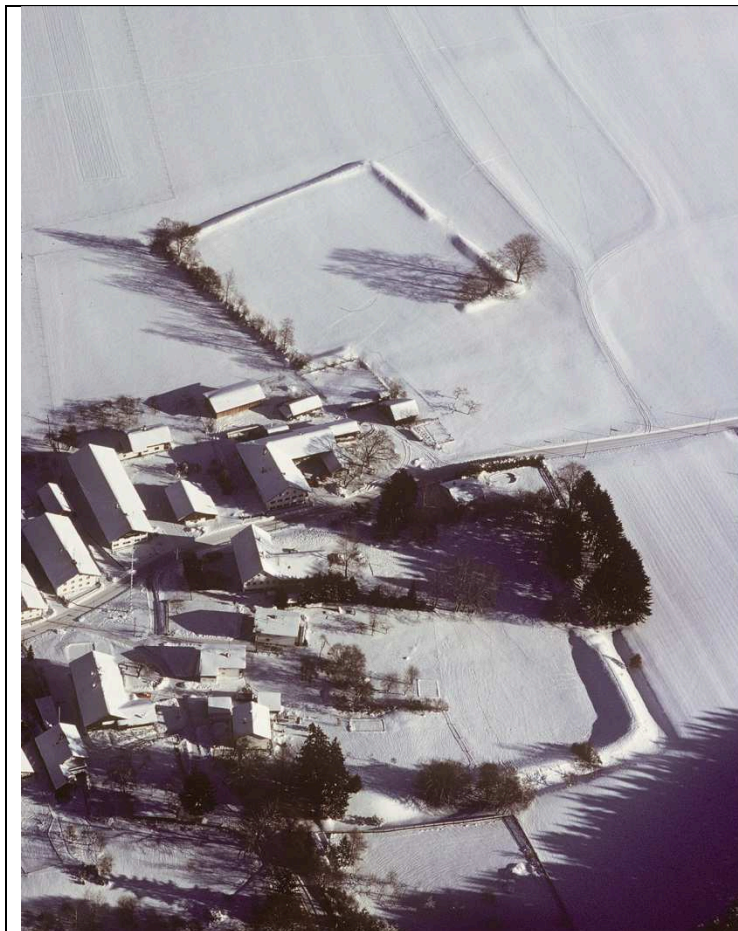


Abb. A37:
 Viereckschanzen Holzhausen,
 BLfD Luftbild Nr.
 8134_002_1111_36 vom
 09.12.1980,
 Fotograf: O. Braasch.
 Blickrichtung von Westen.
 Schanze 1 (im unteren Bildteil)
 ist teilweise überbaut.
 Prospektiert wurde die im
 freien Gelände liegende
 Schanze 2.

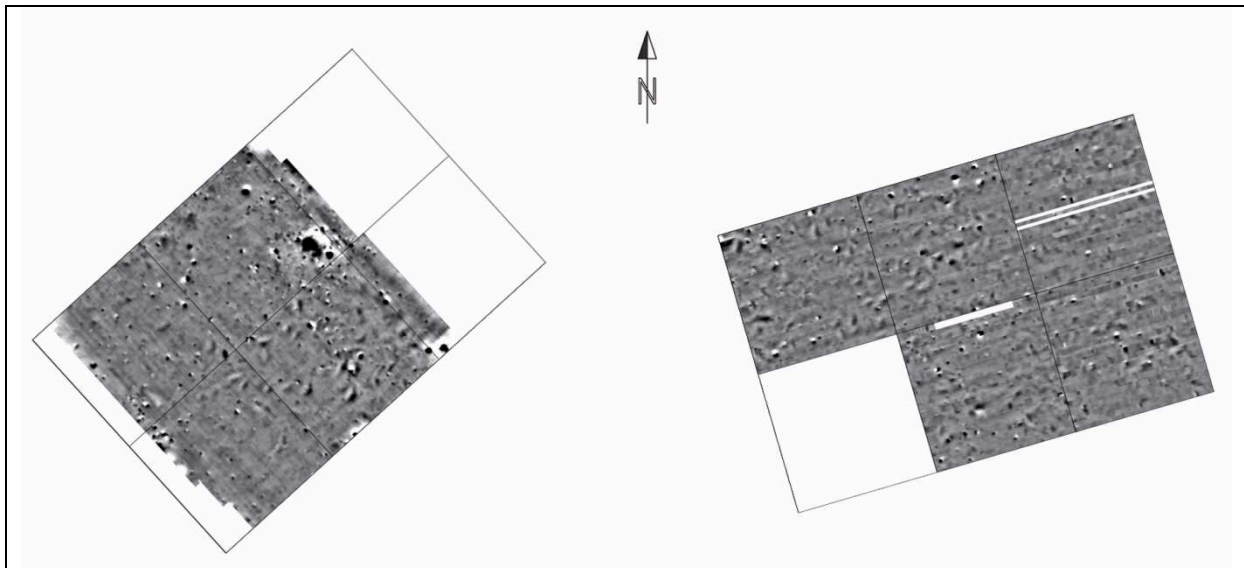


Abb. A38: Viereckschanze Holzhausen, Magnetometerprospektionen Hol97aqh_-8_8nT.tif und Hol97bqh_-8_8nT.tif. Gitterabstand: 40 x 40 Meter. Dynamik: +/- 8 nT. Darstellung im Quadrantenmittel, hochpassgefiltert.

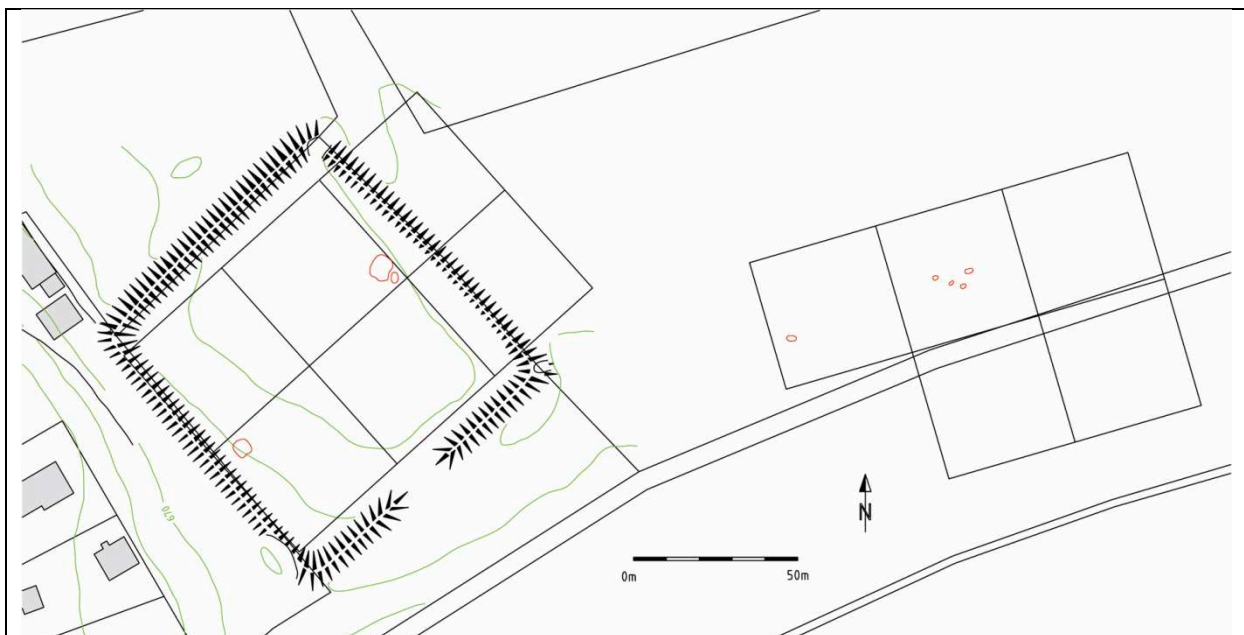
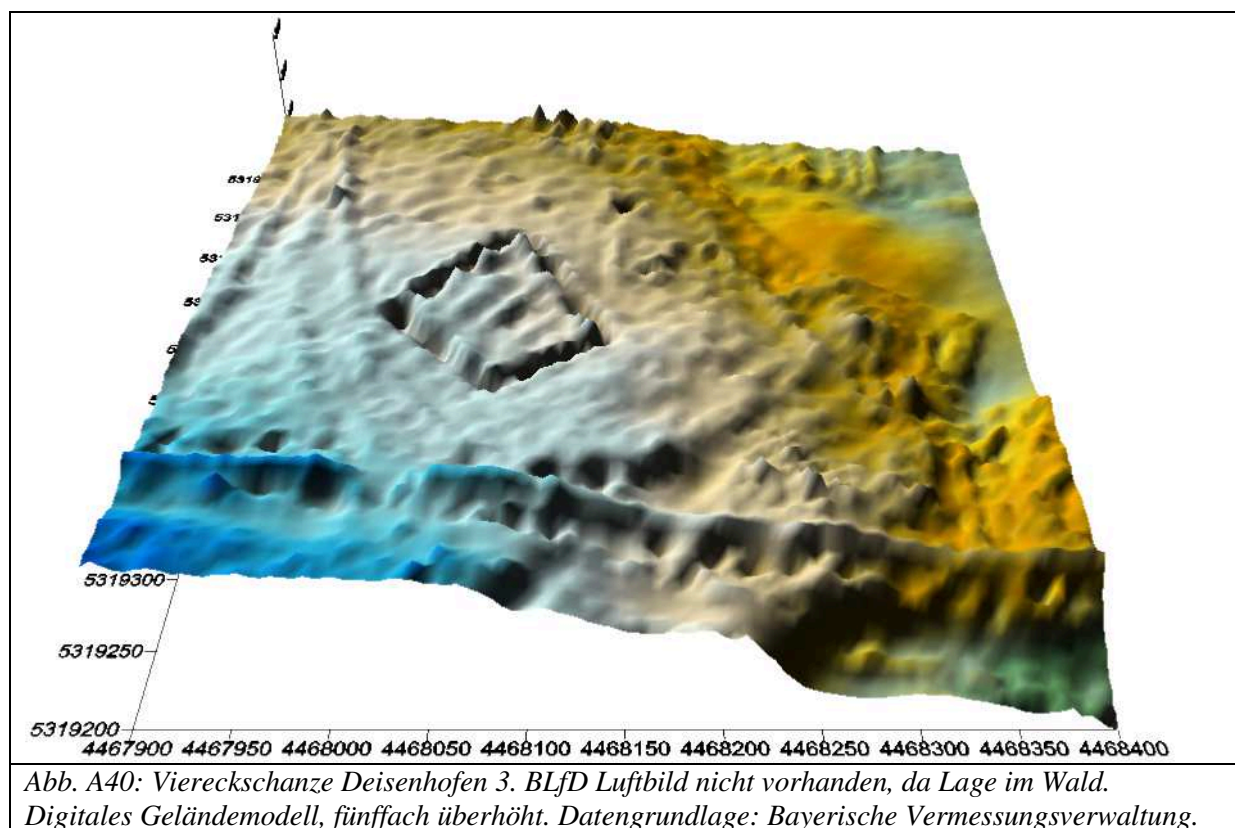


Abb. A39: Viereckschanze Holzhausen, Interpretationsplan.

Bemerkung: Die Verortung des Magnetogramms im Schanzeninneren erfolgte anhand des von Schwarz [1959] vorgelegten Plans. Abweichungen um wenige Meter sind möglich.

Die markierten Stellen korrelieren sehr wahrscheinlich mit dem in den Jahren 1959-1961 gegrabenen Südwest- bzw. dem Nordostschacht und dessen angrenzendem Gebiet (starke Anomalien durch Grabungsnägel, Verschalungsreste etc.).

14	Deisenhofen „Schanze 3“ (Wald)
Lage	Oberbayern, Lkr. München, Gde. + Gmkg. Oberhaching
BLfD Luftbildnummer	L 7934/169
BLfD Fundstellenummer	D-1-7935-0044
Gauß-Krüger-Koord.	4468074, 5319440
Geologie	Münchener Schotterebene. Würmzeitlicher Schotter, z. T. sandig.
Boden	Waldboden, aus carbonatreichem würmzeitlichem Schotter. Stark sandiger Lehm, geröllführend; Braunerden. Trockenes Gelände.
Geländebeschreibung	Relativ eben, schwache Neigung nach Nordosten. Kleines Gewässer 800 Meter südlich, hangabwärts.
Erhaltungszustand	Sehr gut erhalten. Wallhöhen von außen bis 2,8 Meter, von innen bis 1,5 Meter. Grabentiefen bis 1,2 Meter.
Nutzung aktuell	Wald
Uraufnahme 1809	Wald
Renovation 1858	Wald
Bemerkungen	Hochstämmiger Fichtenwald, wenig Unterholzbewuchs. Wallmaterial: Kies. Auffällige Trapezform.
Zeitraum der Prospektion	05.07.2006 / 17.-18.10.2006
Prospektiert von:	Berghausen, Faßbinder
Literatur	SCHWARZ [1959 / 2007] Bl. 26 – RGZM [1971]



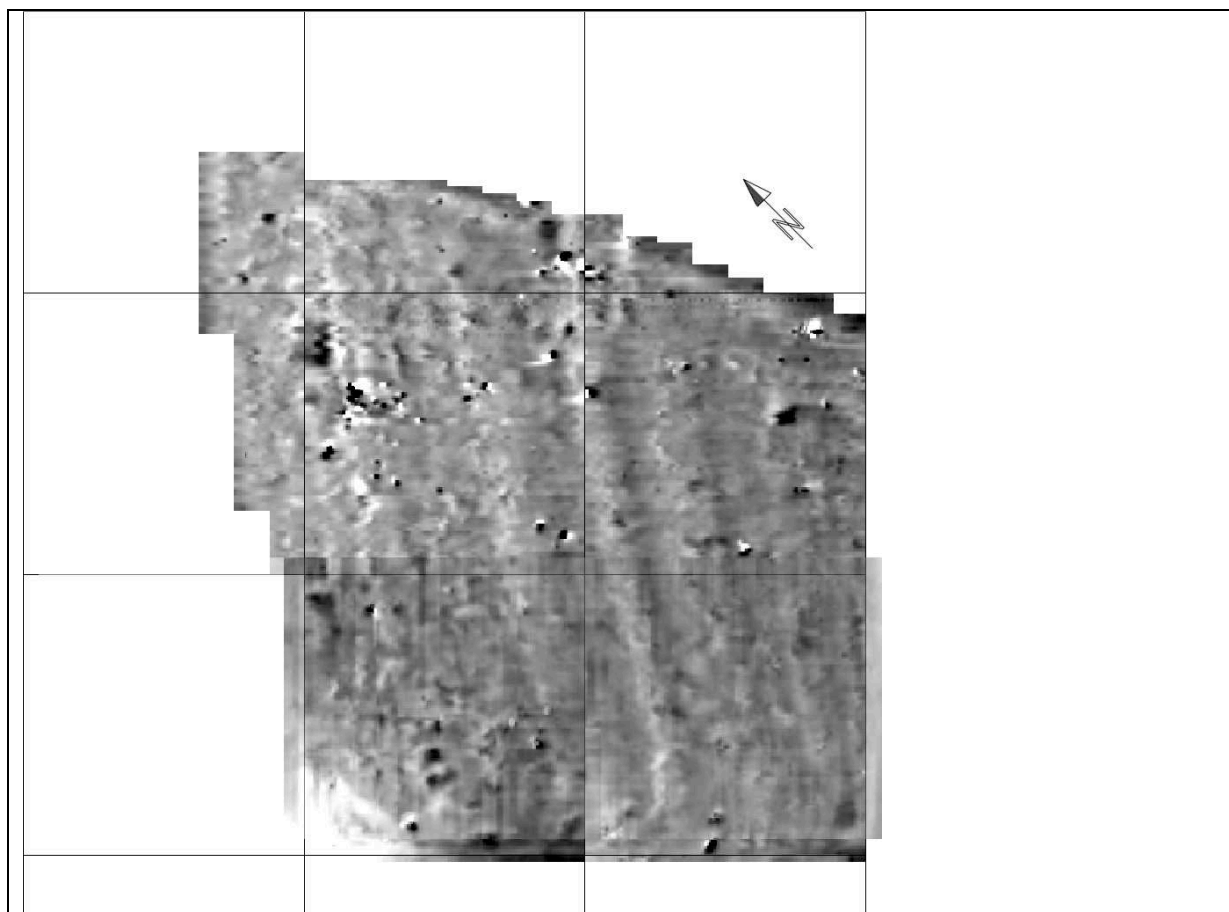


Abb. A41: Viereckschanze Deisenhofen 3, Magnetometerprospektion Dei06ab_-8_8nT.tif, Überlagerung zweier Prospektionen. Gitterabstand: 40 x 40 Meter. Dynamik: +/- 8nT. Darstellung im Zeilenmittel.

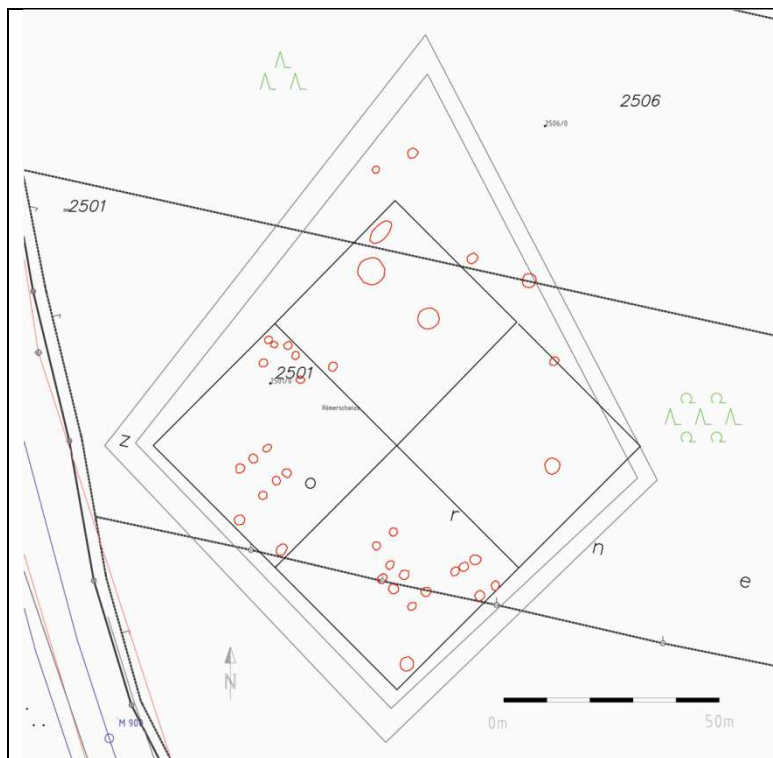


Abb. A42: Viereckschanze Deisenhofen 3, Interpretationsplan.

15	Deisenhofen 1 „Schanze 1“ (Feld)
Lage	Oberbayern, Lkr. München, Gde. + Gmkg. Oberhaching
BLfD Luftbildnummer	L 7934/003
Fundstelle / Maßnahme Nr.	D-1-7935-0042 / M-2009-1106
Gauß-Krüger-Koord.	4470543, 5319642
Geologie	Münchener Schotterebene. Würmzeitlicher Schotter, z. T. sandig
Boden	Braunerde und Parabraunerde, z.T. tiefreichend humos, aus carbonatreichem würmzeitlichem Schotter, örtlich mit mittlerer Hochflutlehmüberdeckung. Sandiger Lehm, geröllführend. Trockenes Gelände.
Geländebeschreibung	Eben. Rezentler Bachlauf 800 Meter nördlich gelegen. Kiesgrube direkt nordöstlich der Viereckschanze.
Erhaltungszustand	Prospektierter Kernbereich der Schanze: Nord- und Südwall erhalten, Höhen von außen bis über 3 Meter, von innen bis 2 Meter. Ost- und Westwall abgetragen. Gräben teilweise verfüllt, noch spürbar.
Nutzung aktuell Uraufnahme 1809 Renovation 1858	Kernbereich Grünland, Annex Landwirtschaft Landwirtschaft Landwirtschaft
Bemerkungen	Mehrteilige Schanze mit Annex, Größe ca. 480 x 550 Meter
Zeitraum der Prospektion	2000
Prospektiert von:	Becker
Literatur	SCHWARZ [1959 / 2007] Bl. 24 – RGZM [1971] – BVGB [1995] – KELLER



Abb. A43: Viereckschanze Deisenhofen 1, BLfD Luftbild Nr. 7934_003_6746_30 vom 29.07.1992, Fotograf: K. Leidorf. Blickrichtung von Nordwesten.

Der zwischen Kernbereich und Annex unterbrochene Graben zeichnet sich deutlich als helles Band westlich des Feldweges ab, der Wall ist größtenteils vom Feldweg überdeckt.

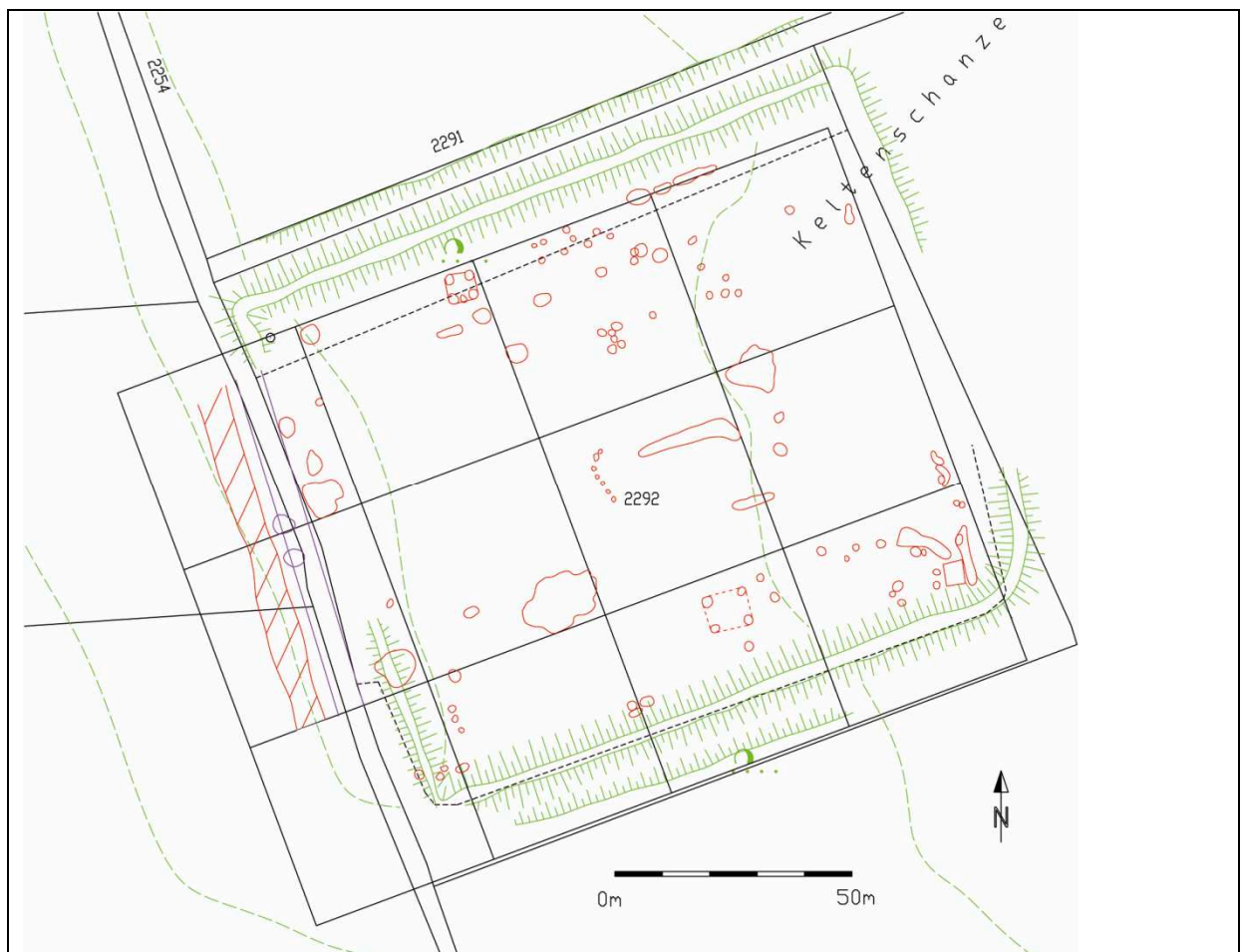
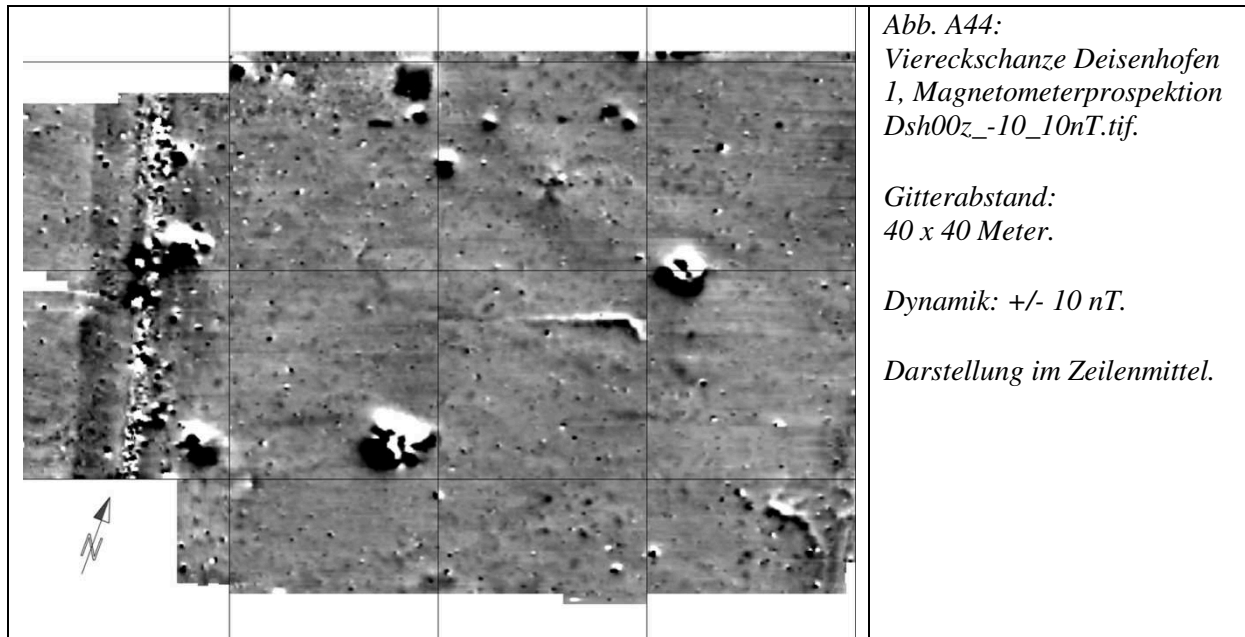


Abb. A45: Viereckschanze Deisenhofen 1, Interpretationsplan.

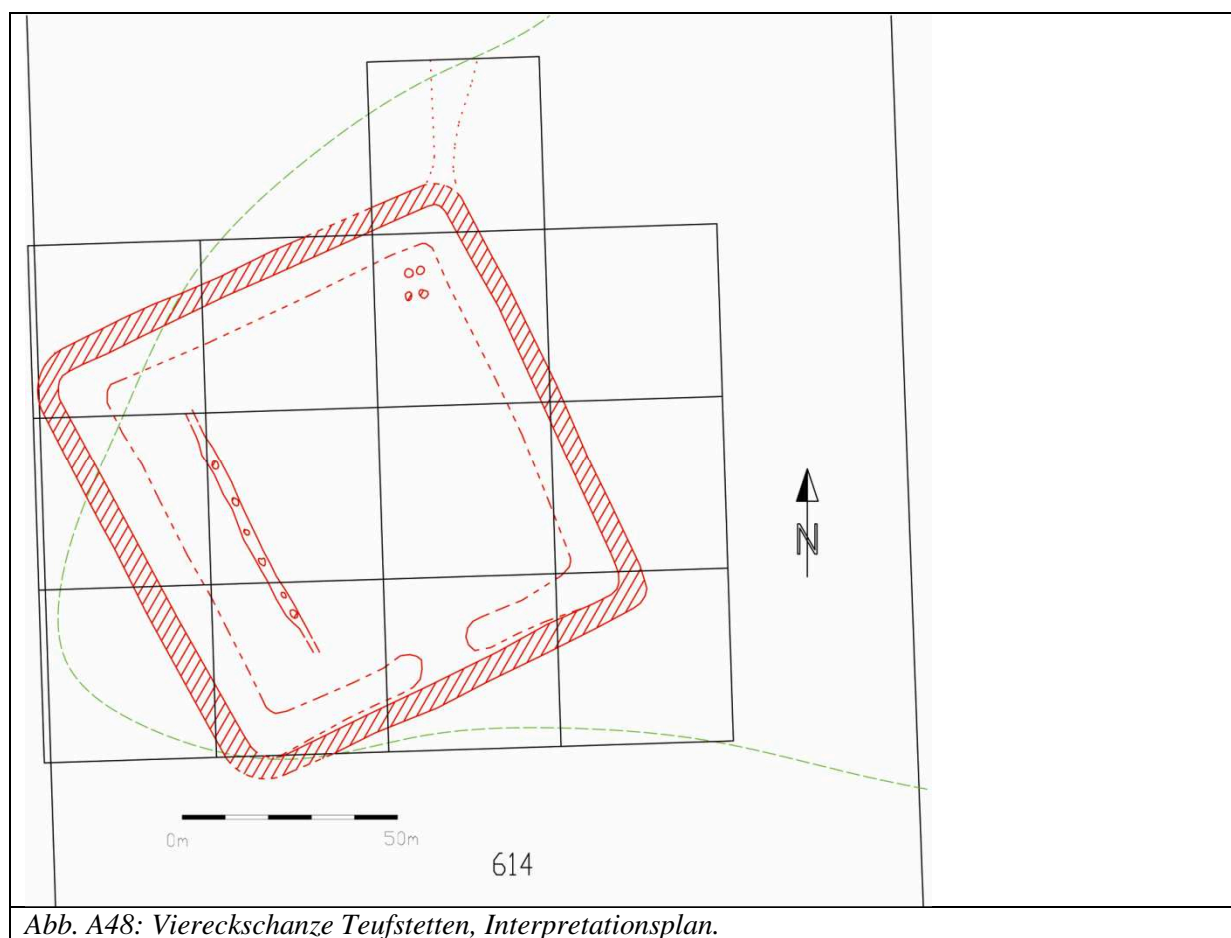
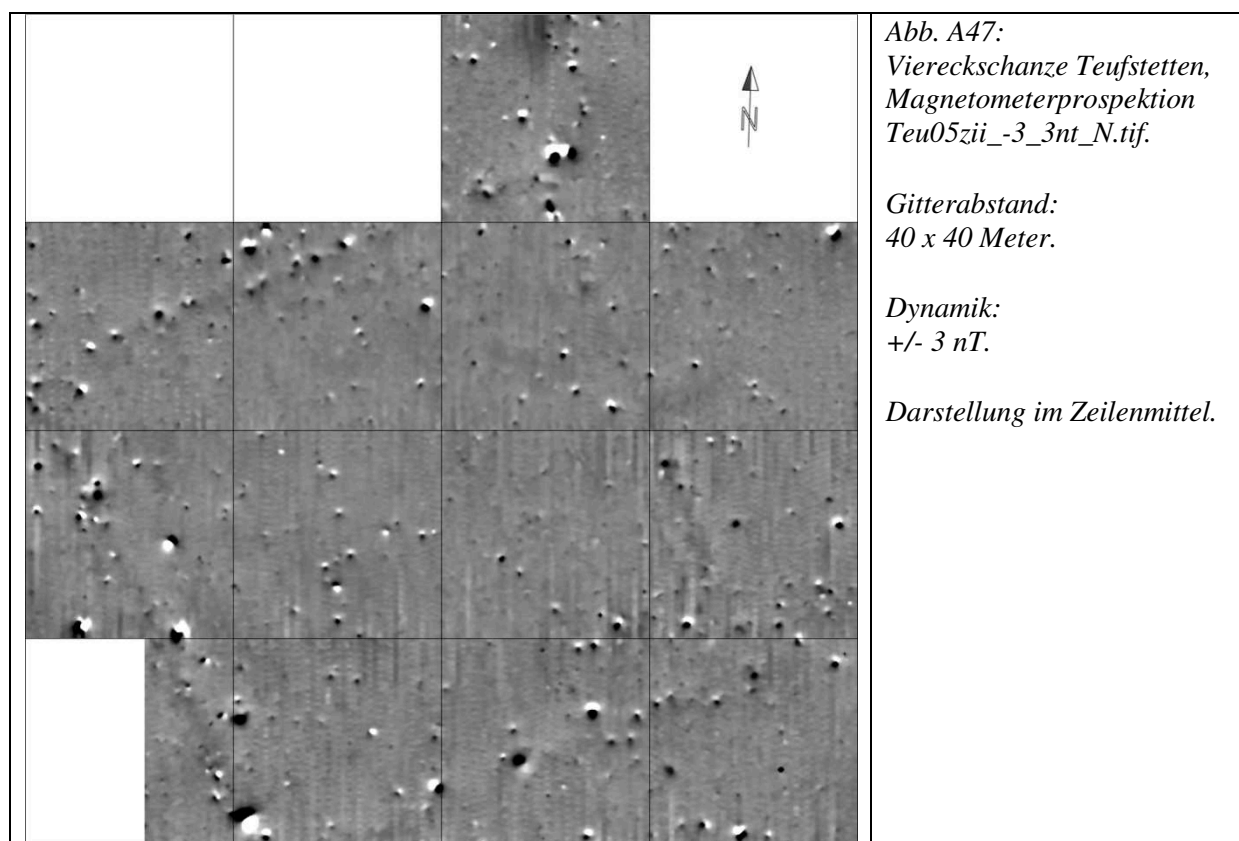
Bemerkung: Das Magnetogramm zeichnet sich aus durch mehrere extrem starke magnetische Anomalien (mehrere 100 nT). Diese sind vermutlich als Ofen- oder Eisenverhüttungsplätze zu interpretieren, wobei auch eine nachkeltische Zeitstellung möglich ist.

Die nördlich gelegene dunkle Struktur löst sich bei geänderter Auflösung auf in ein Gebäude mit fünf erkennbaren Pfostenstellungen, welches vermutlich einem Brand ausgesetzt war.

16	Teufstetten
Lage	Oberbayern, Lkr. Erding, Gde. + Gmkg. Wörth
BLfD Luftbildnummer	L 7736/024
BLfD Fundstellenummer	D-1-7737-0066 / M-2009-1091
Gauß-Krüger-Koord.	4494758, 5346000
Geologie	Erdinger Altmoräne. Löß, Lößlehm, Decklehm, z.T. Fließerde - vorwiegend Schluff bzw. Lehm.
Boden	Vorherrschend Braunerde-Pseudogleye und Pseudogleye aus Lößlehm über Lößlehm-Fließerde, z.T. über Verwitterungslehm-Fließerde. Staubsandiger Lehm. Trockenes Gelände.
Geländebeschreibung	Relativ eben. Bachlauf 200 Meter westlich hangabwärts, sowie 1000 Meter östlich auf gleicher Geländehöhe.
Erhaltungszustand	Nahezu völlig verebnet.
Nutzung aktuell	Landwirtschaft
Uraufnahme (1810)	Grünland
Renovation (1856)	Grünland
Zeitraum der Prospektion	29.09.2005 / 06.10.2005
Prospektiert von:	Berghausen, Faßbinder
Literatur	SCHWARZ [1959 / 2007] Bl. 10 – CHRISTLEIN & BRAASCH [1982] – BERGHAUSEN ET AL. [2006] – KELLER [1977]



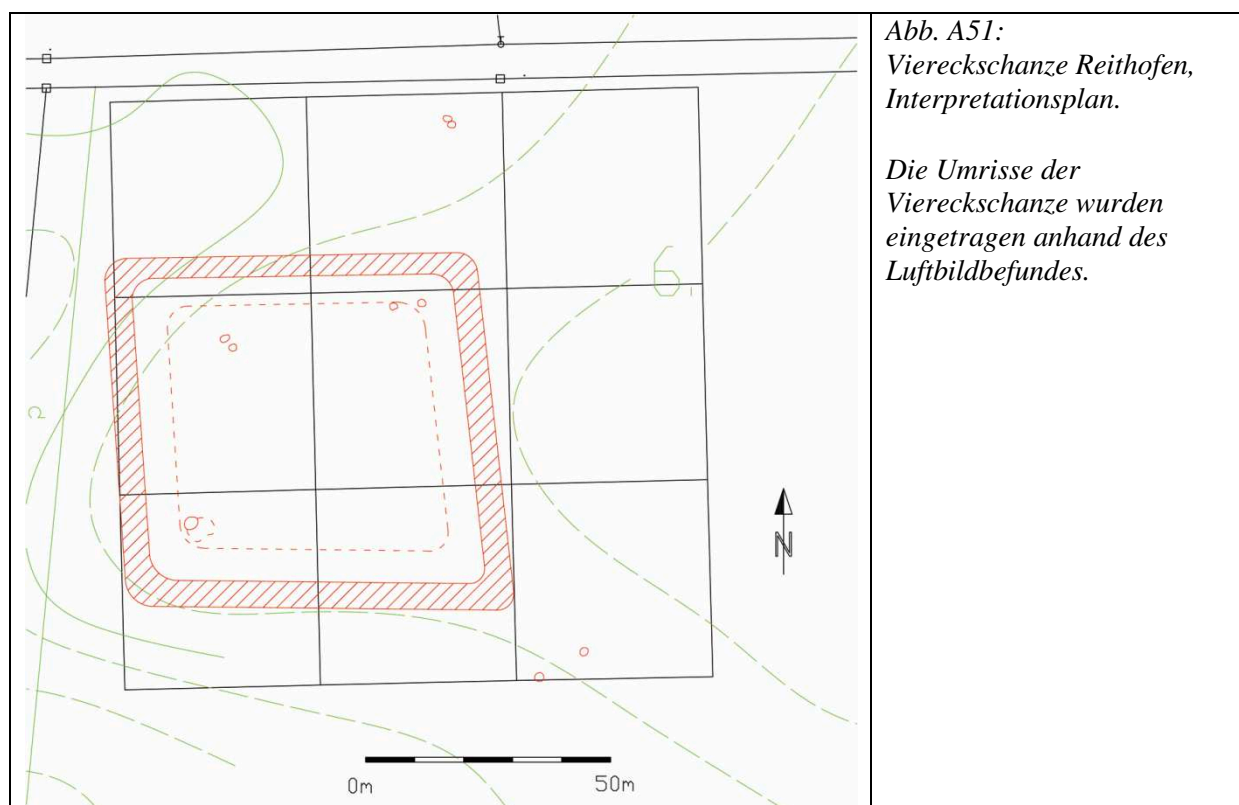
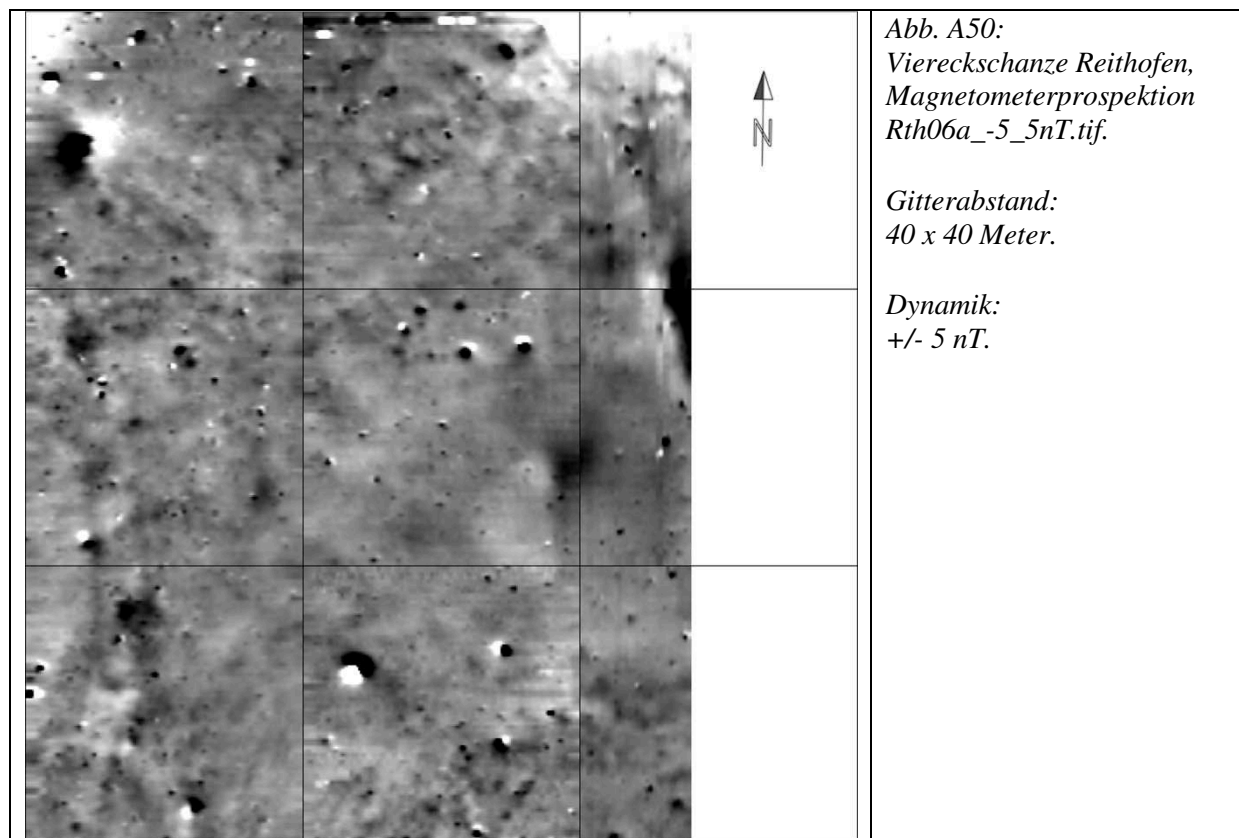
Abb. A46: Viereckschanze Teufstetten, BLfD Luftbild Nr. 7736_024_8476_023 vom 14.07.2001, Fotograf: K. Leidorf. Blickrichtung von Nordosten.



17	Reithofen
Lage	Oberbayern, Lkr. Erding, Gde. + Gmkg. Pastetten
BLfD Luftbildnummer	L 7736/250-1
BLfD Fundstellenummer	D-1-7737-0150 / M-2009-1095
Gauß-Krüger-Koord.	4498059, 5340224
Geologie	Isener Altmoräne mit Endmoränenzügen, z.T. mit Vorstoßschotter - rißzeitlich - Kies, sandig bis tonig-schluffig, z.T. Konglomerat.
Boden	Vorherrschend bis ausschließlich Braunerden aus Lößlehm über Lößlehm-Fließerde. Sehr staunasser Boden (mündl. Mitteilung des Eigentümers)
Geländebeschreibung	Relativ eben, sehr leichte Neigung nach Westen. Bachlauf 100 Meter südwestlich, hangabwärts gelegen.
Erhaltungszustand	Verebnet.
Nutzung aktuell	Landwirtschaft
Uraufnahme (1810)	Landwirtschaft
Renovation (1855)	Landwirtschaft
Zeitraum der Prospektion	22./23.08.2006
Prospektiert von:	Berghausen
Literatur	IRLINGER [1996b]



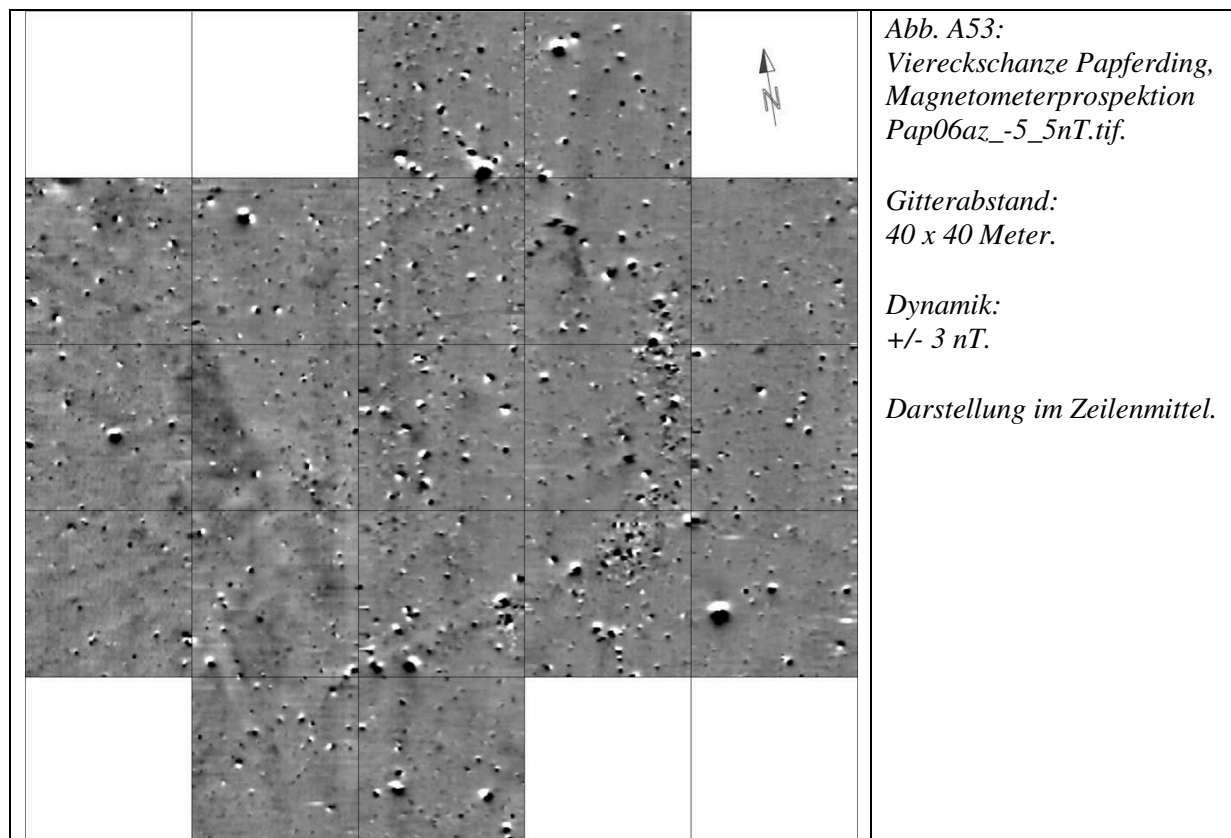
Abb. A49: Viereckschanze Reithofen, BLfD Luftbild Nr. 7736_250_4510_25 vom 29.07.1986, Fotograf: O. Braasch. Blickrichtung von Norden.



18	Papferding
Lage	Oberbayern, Lkr. Erding, Gde. Bockhorn, Gmkg. Salmannskirchen
BLfD Luftbildnummer	L 7736/029-1
BLfD Fundstellenummer	D-1-7737-0002 / M-2009-1092
Gauß-Krüger-Koord.	4498240, 5349754
Geologie	Erdinger Altmoräne mit Endmoränenzügen, z.T. mit Vorstoßschotter – rißzeitlich. Kies, sandig bis tonig-schluffig.
Boden	Pseudogley-Braunerde und Braunerde, z.T. tiefreichend humos, aus Lößlehm, z. T. über Verwitterungslehm-Fließerde. Staubsandiger Lehm.
Geländebeschreibung	Randlage auf Hochfläche, diese leicht nach Westen und Süden hin abfallend. Bachlauf 100 Meter westlich und südlich der Schanze, hangabwärts gelegen.
Erhaltungszustand	Nahezu völlig verebnet. Wälle und Gräben nur noch teilweise, vor allem im Süden, als Geländestufen spürbar.
Nutzung aktuell	Landwirtschaft
Uraufnahme (1811)	Wald
Renovation (1856)	Teils noch Wald, teils Landwirtschaft
Zeitraum der Prospektion	18./20.04.2006, 03.05.2006
Prospektiert von:	Berghausen
Literatur	SCHWARZ [1959 / 2007] Bl. 9 – BERGHAUSEN ET AL. [2007a] – BERGHAUSEN ET AL. [2007b] – KRAUSE [2008]



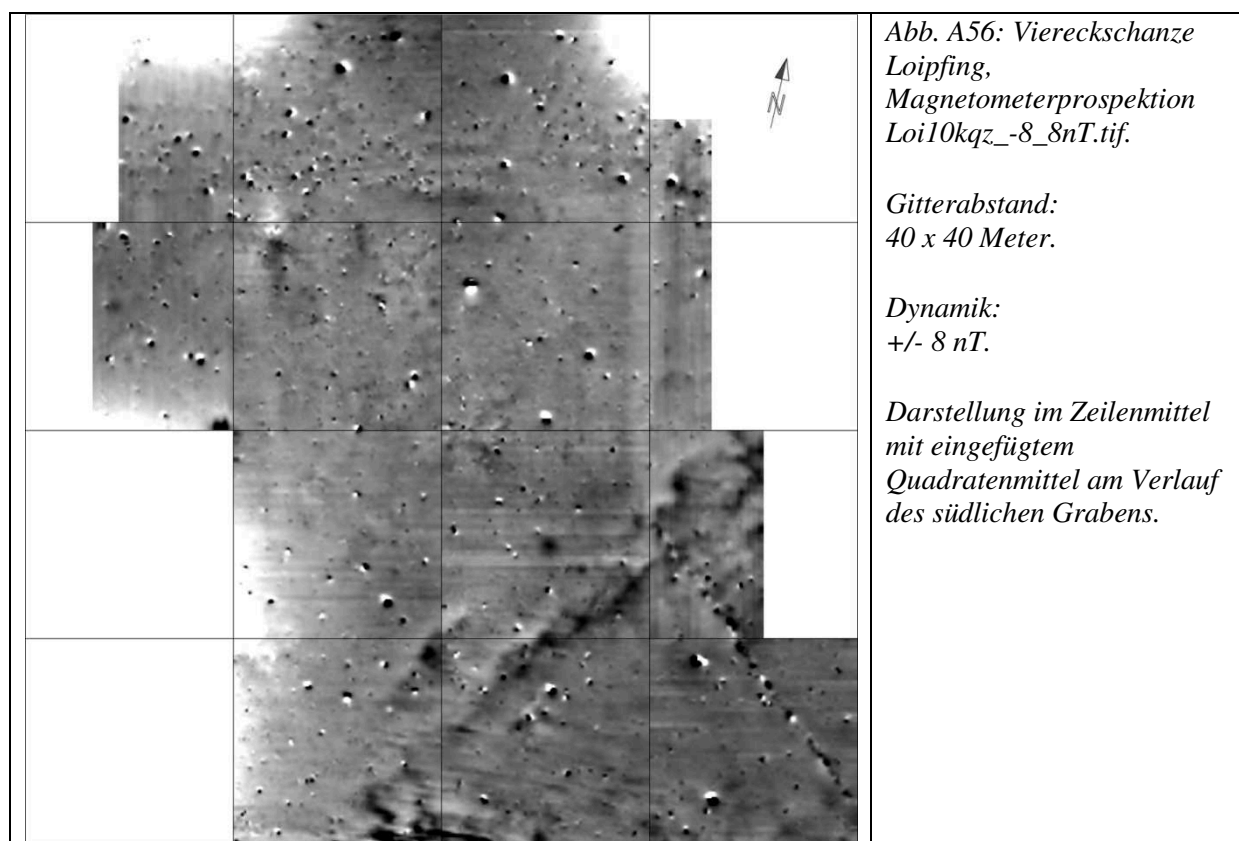
Abb. A52: Viereckschanze Papferding, BLfD Luftbild Nr. 7736_029_173_36 vom 25.03.1979, Fotograf: O. Braasch. Blickrichtung von Süden.



19	Loipfing
Lage	Oberbayern, Lkr. Erding, Gde. Isen, Gmkg. Westach
BLfD Luftbildnummer	L 7938/104
BLfD Fundstellenummer	D-1-7838-0008
Gauß-Krüger-Koord.	4502020, 5339035
Geologie	Isener Altmoräne mit Endmoränenzügen, z.T. mit Vorstoßschotter - mindelzeitlich und älter - Kies, sandig bis tonig-schluffig, z.T. Konglomerat.
Boden	Überwiegend Braunerden und gering verbreitet Parabraunerde-Braunerden aus Fließerde über Verwitterungsbildungen der Altmoräne.
Geländebeschreibung	Am Nordosthang einer leichten Geländekuppe. Bachlauf knapp 100 Meter nördlich der Schanze, hangabwärts gelegen.
Erhaltungszustand	Nahezu verebnet, Wall und Graben nur noch als Geländestufen spürbar.
Nutzung aktuell	Landwirtschaft
Uraufnahme (1812)	Landwirtschaft
Renovation (1855)	Landwirtschaft
Zeitraum der Prospektion	29.06.2010 / 01.07.2010
Prospektiert von:	F. Becker, Berghausen, Deller, Linck; Krause.
Literatur	WEBER [1909/10] – KELLER [1977]



Abb. A55: Viereckschanze Loipfing, BLfD Luftbild Nr. 7938_104_7634_13 vom 18.12.1996, Fotograf: K. Leidorf. Blickrichtung von Südosten.



20	Maxing
Lage	Oberbayern, Lkr. Mühldorf am Inn, Gde. + Gmkg. Erharting
BLfD Luftbildnummer	L 7740/009
BLfD Fundstellenummer	D-1-7741-0043 / M-2009-1096
Gauß-Krüger-Koord.	4541922, 5348544
Geologie	Inn-Region, Mühldorfer Schotterfelder, würmzeitlich; Kies, sandig.
Boden	Braunerde und Parabraunerde, z.T. tiefreichend humos, aus carbonatreichem Schotter, örtlich mit mittlerer Hochflutlehmüberdeckung. Geröllhaltiger, sandiger Lehm. Trockenes Ackerland.
Geländebeschreibung	Relativ eben. Wasserlauf (Isen) 400 Meter nördlich der Schanze.
Erhaltungszustand	Zum Zeitpunkt der Prospektion: Nahezu völlig verebnet. Mittlerweile teilweise durch Straße überbaut.
Nutzung aktuell	Landwirtschaft
Uraufnahme (1812)	Landwirtschaft
Renovation (1854)	Landwirtschaft
Zeitraum der Prospektion	1999
Prospektiert von:	Faßbinder
Literatur	WEBER [1909/10] – KELLER [1977] – BVGB [1992] – BVGB [1993] – BVGB [1994] – SCHWARZ [1959 / 2007] Bl. 22 – FAßBINDER & IRLINGER [2000] – KELLER [1977]

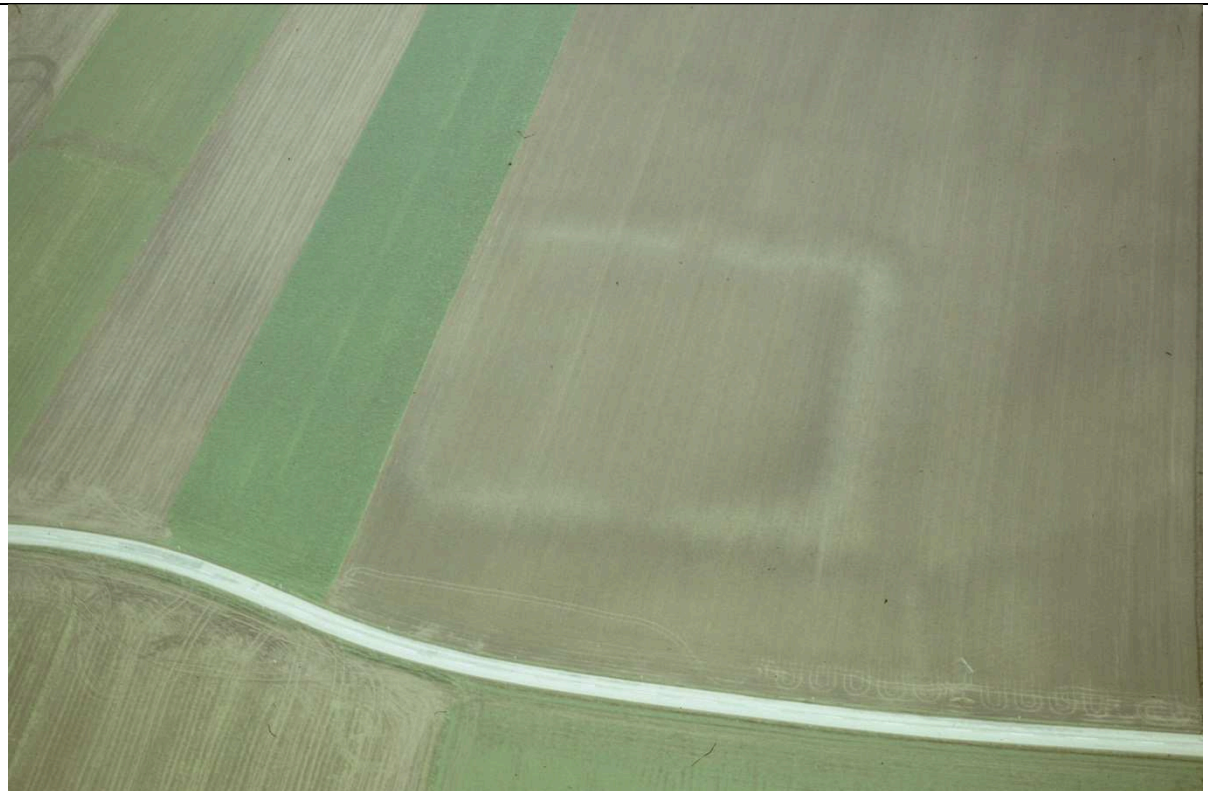


Abb. A58: Viereckschanze Maxing, BLfD Luftbild Nr. 7740_009_1851_32 vom 21.11.1981, Fotograf: O. Braasch. Blickrichtung von Norden.

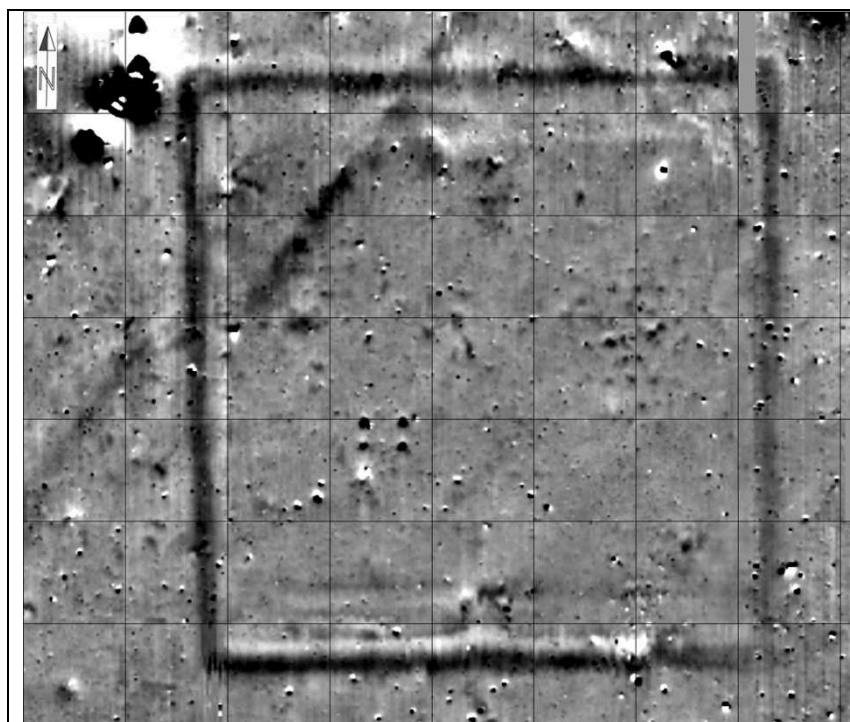


Abb. A59:
Viereckschanze Maxing,
Magnetometerprospektion
Max99a_+6nT_N.tif.

Gitterabstand:
20 x 20 Meter.

Dynamik:
+/- 6 nT.

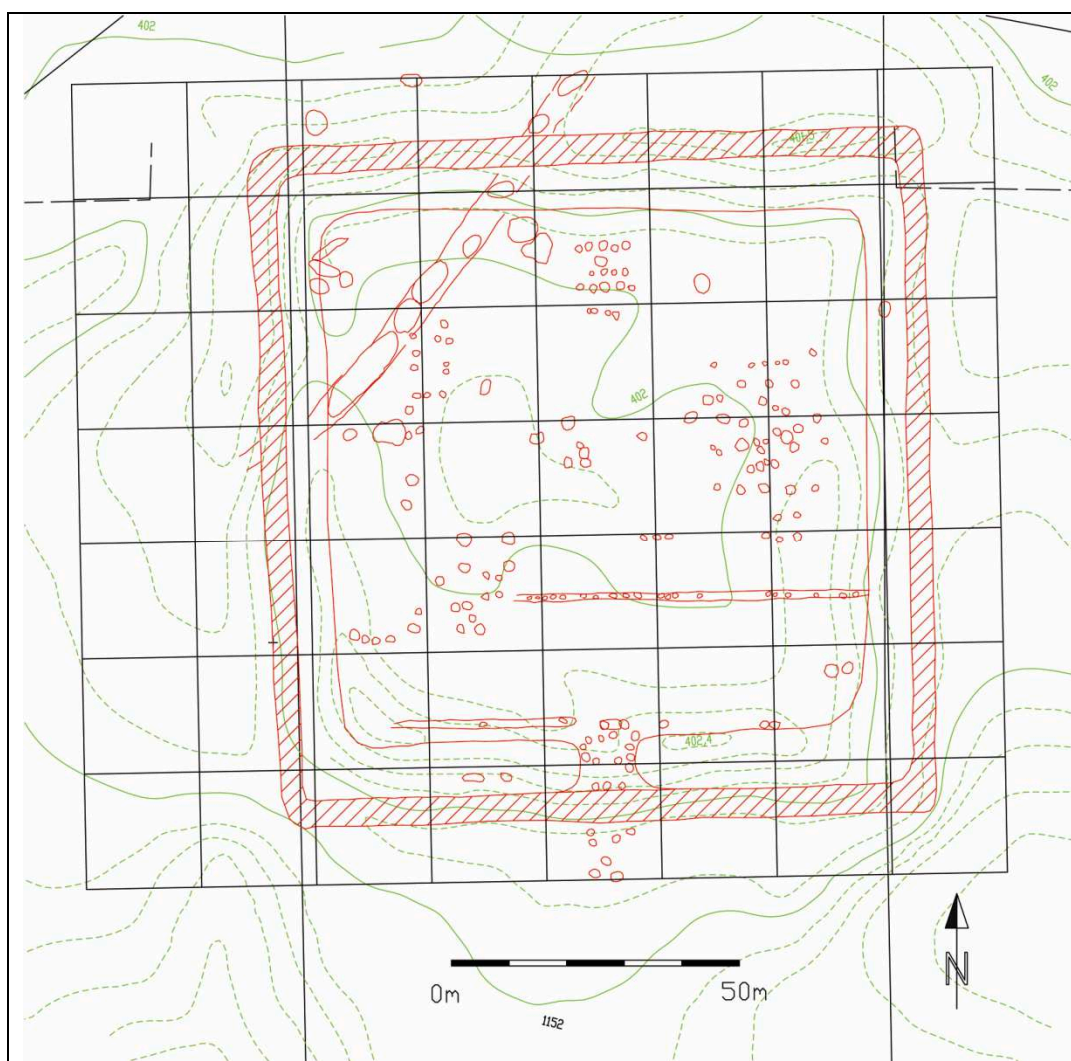
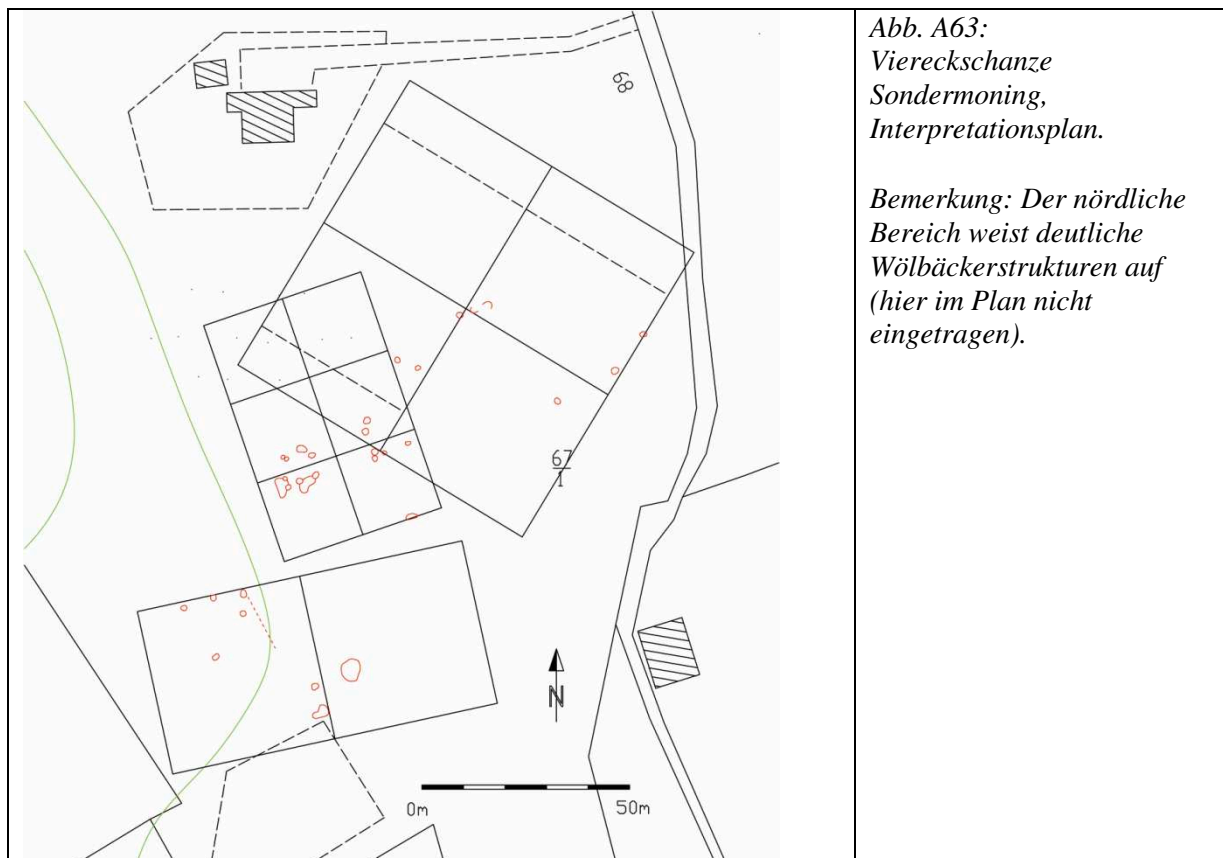


Abb. A60: Viereckschanze Maxing, Interpretationsplan.

21	Sondermoning
Lage	Oberbayern, Lkr. Traunstein, Gde. Nußdorf, Gmkg. Sondermoning
BLfD Luftbildnummer	L 8140/013a
BLfD Fundstellenummer	D-1-8041-0057 / M-2009-1134
Gauß-Krüger-Koord.	4542650, 5307720
Geologie	Inn-Chiemsee-Jungmoräne, würmzeitlich, z.T. mit Vorstoßschotter - Kies, sandig bis tonig-schluffig.
Boden	Bodenkarte 1:500.000: Auf kurze Entfernung wechselnde Bodentypen von stark sandigem Lehm bis zum Ton. Braunerden. Trockenes Gelände.
Geländebeschreibung	Auf Plateau eines leichten Westhangs. Wasserlauf 400 Meter südlich der Anlage, hangabwärts gelegen.
Erhaltungszustand	Ostwall völlig abgetragen, andere Wallbereiche als Geländestufen bis 2 Meter erhalten. Gräben verfüllt, nur im Süden und Westen als Mulden erkennbar.
Nutzung aktuell Uraufnahme (1810/1850)	Grünland; früher teilweise mit Obstbaumbestand Wald
Bemerkung	Wallmaterial Kies.
Zeitraum der Prospektion	2000/01
Prospektiert von:	Faßbinder
Literatur	WEBER [1909/10] – SCHWARZ [1959 / 2007] Blatt 34 – BVGB [2005] – IRLINGER [2005] – KELLER [1977]



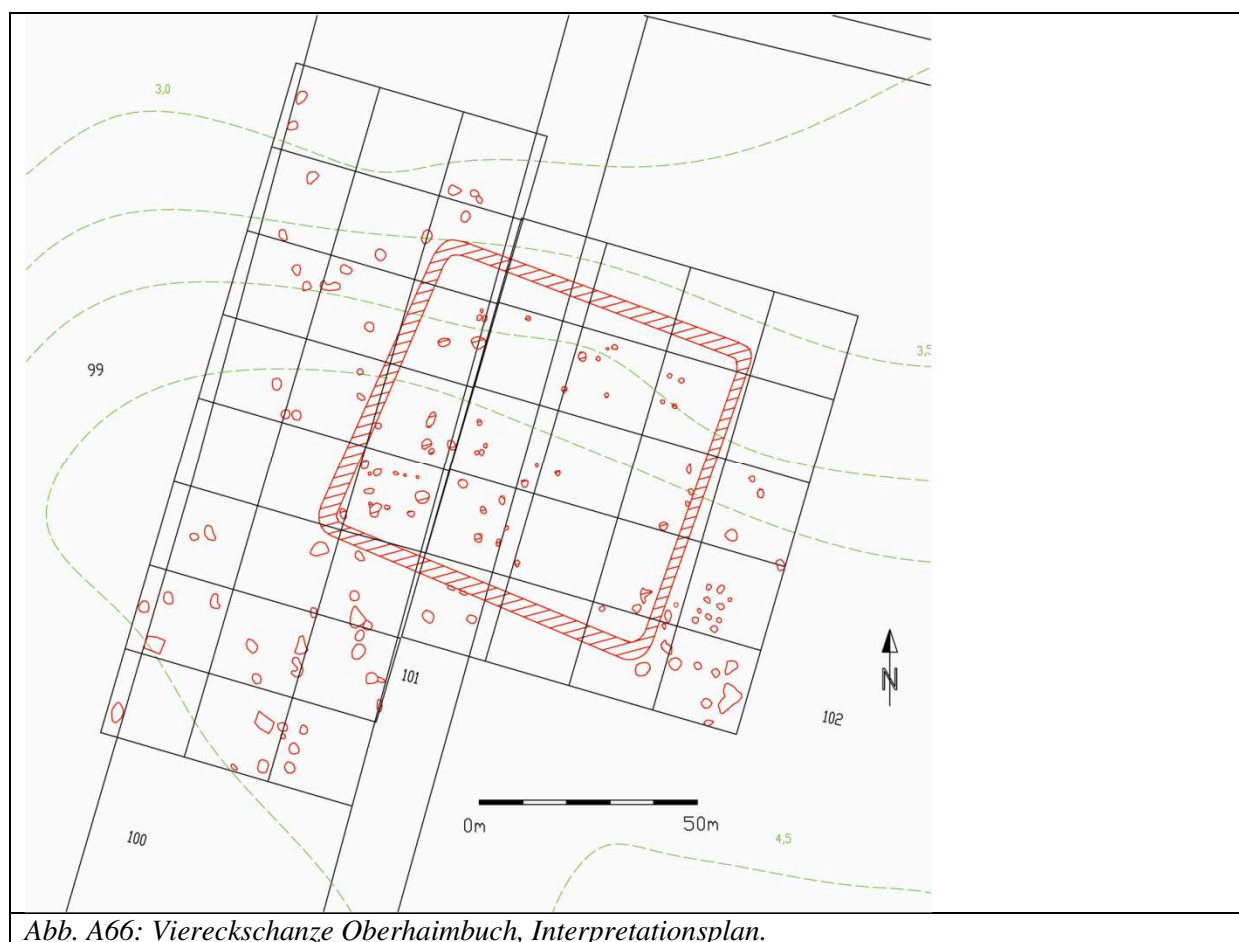
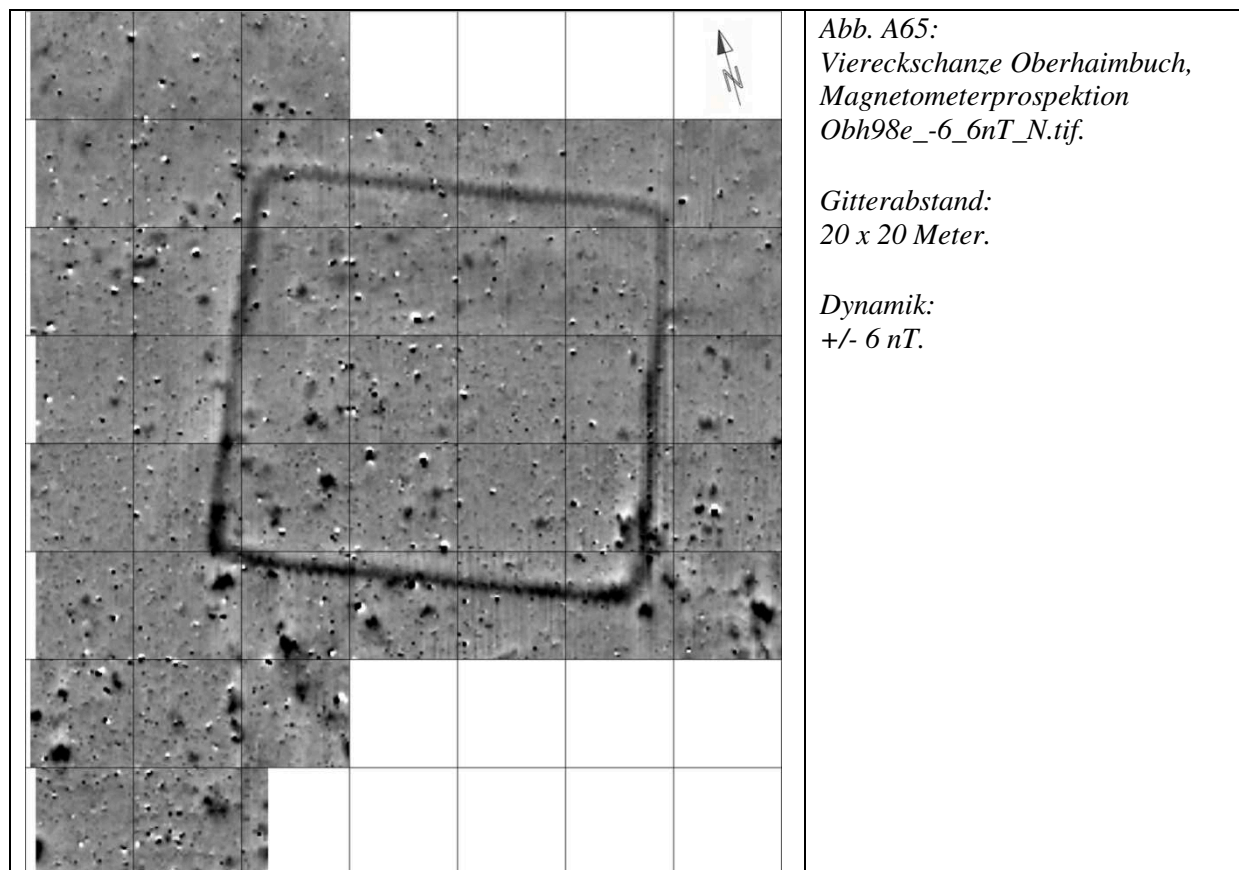
Abb. A61: Viereckschanze Sondermoning, BLfD Luftbild Nr. 8140_013a_1277_03 vom 21.03.1981, Fotograf: O. Braasch. Blickrichtung von Osten.



22	Oberhaimbuch
Lage	Oberpfalz, Lkr. Regensburg, Gde. Mötzing, Gmkg. Haimbuch
BLfD Luftbildnummer	L 7140/092
BLfD Fundstellenummer	D-3-7040-0006 / M-2009-1002
Gauß-Krüger-Koord.	4528497, 5418848
Geologie	Donauaue. Schotter, rißzeitlich (Hochterrasse) - Kies, sandig, z.T. Konglomerat.
Boden	Bodenkarte 1:500.000: Sandiger Lehm, z. T. lehmiger Sand bis stark lehmiger Sand, z. T. geröll- oder geschiebeführend, z. T. auf Schotter
Geländebeschreibung	Nahezu eben. Wasserlauf 500 Meter südöstlich der Schanze.
Erhaltungszustand	Verebnet.
Nutzung aktuell	Landwirtschaft
Uraufnahme (1816)	Landwirtschaft
Zeitraum der Prospektion	1998
Prospektiert von:	Faßbinder
Literatur	FAßBINDER & IRLINGER [1999C] – BVGB [2000]



Abb. A64: Viereckschanze Oberhaimbuch, BLfD Luftbild Nr. 7140_092_3144i_06 vom 08.07.1983, Fotograf: O. Braasch. Blickrichtung von Westen.



23	Pfeffenhausen
Lage	Niederbayern, Lkr. Landshut, Gde. + Gmkg. Pfeffenhausen
BLfD Luftbildnummer	L 7336/067-4
BLfD Fundstellenummer	D-2-7337-0060 / M-2009-1023
Gauß-Krüger-Koord.	4497284 (?), 5390515
Geologie	Donau-Isar-Hügelland; Löß, Lößlehm, Decklehm.
Boden	Parabraunerde und Braunerde aus Lößlehm über carbonatreichem Löß.
Geländebeschreibung	Relativ eben; auf leichtem Geländerrücken. Bachlauf 200 Meter nordwestlich und kleiner See 200 Meter südöstlich der Anlage, hangabwärts gelegen.
Erhaltungszustand	Verebnet.
Nutzung aktuell	Landwirtschaft
Uraufnahme (1815)	Landwirtschaft
Zeitraum der Prospektion	2004
Prospektiert von:	Faßbinder
Literatur	BVGB [2006] – FAßBINDER & IRLINGER [2005]



Abb. A67: Viereckschanze Pfeffenhausen, BLfD Luftbild Nr. 7336_067_8808_32 vom 12.08.2003, Fotograf: K. Leidorf. Blickrichtung von Südosten.

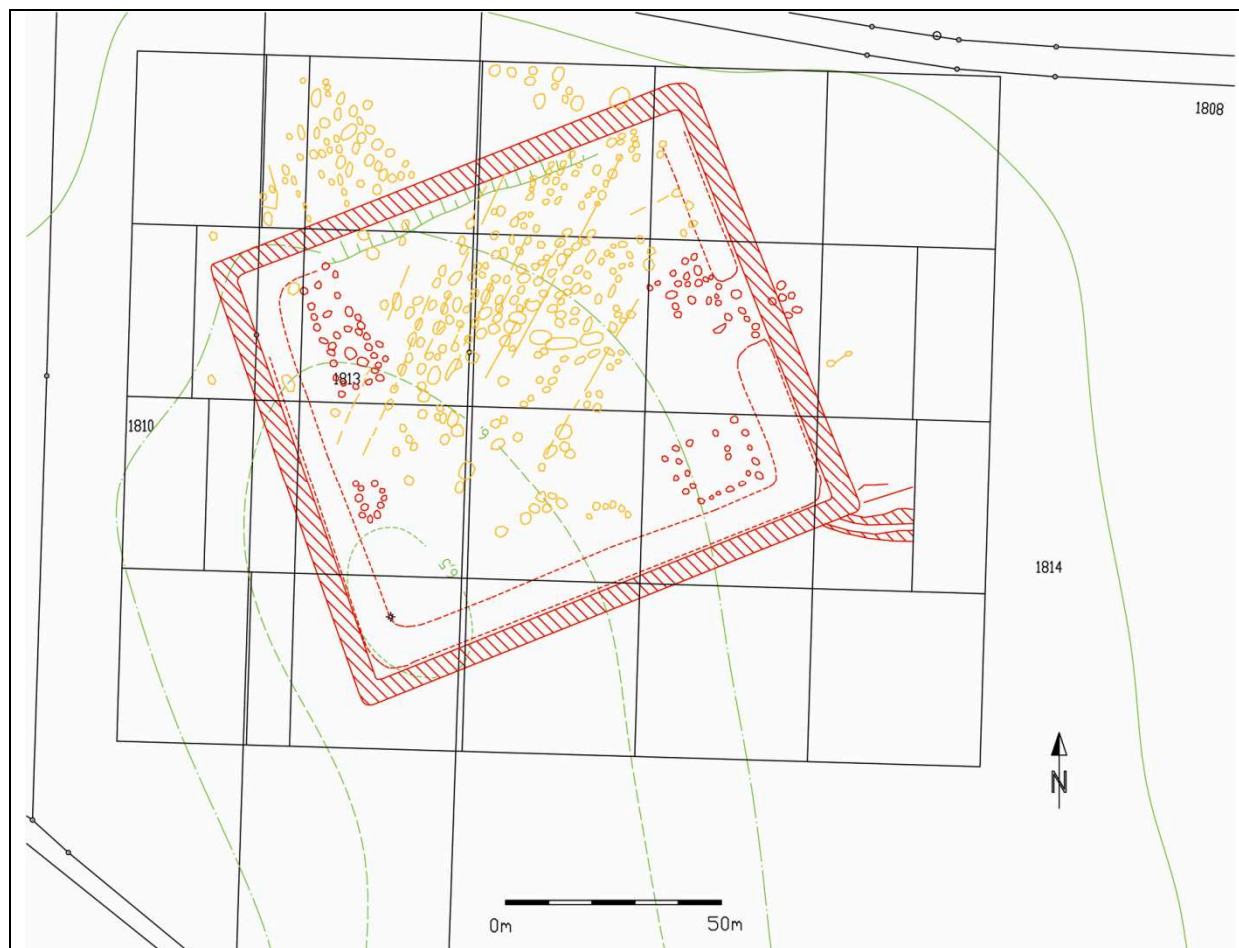
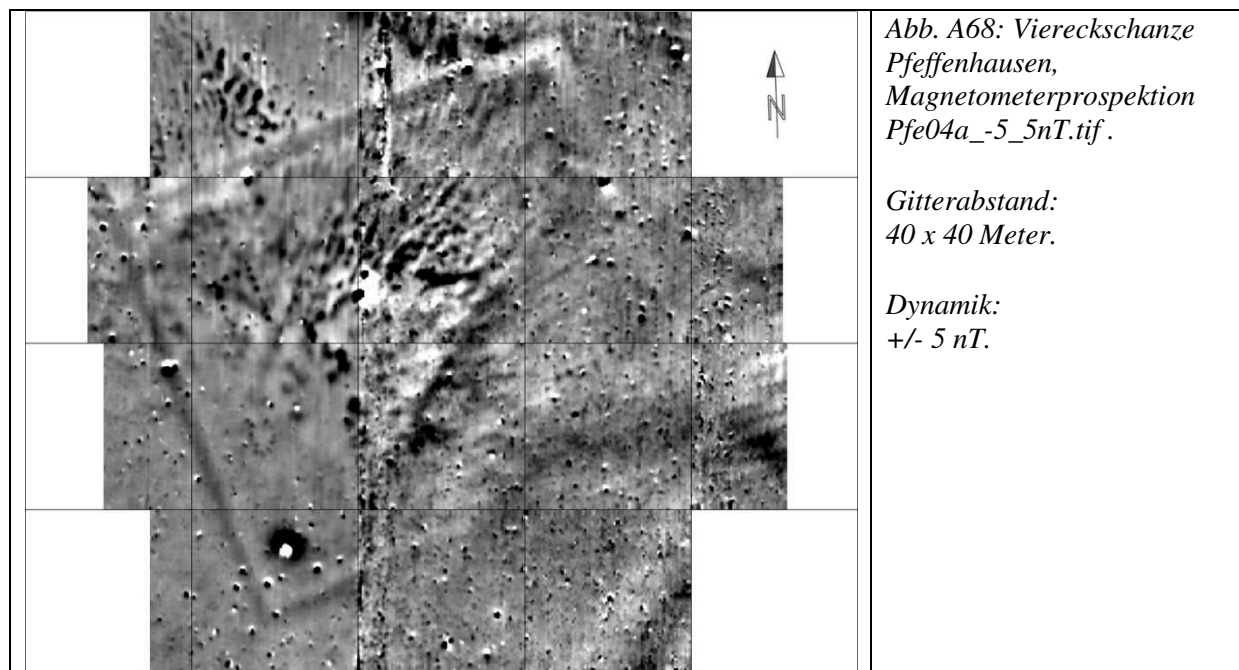
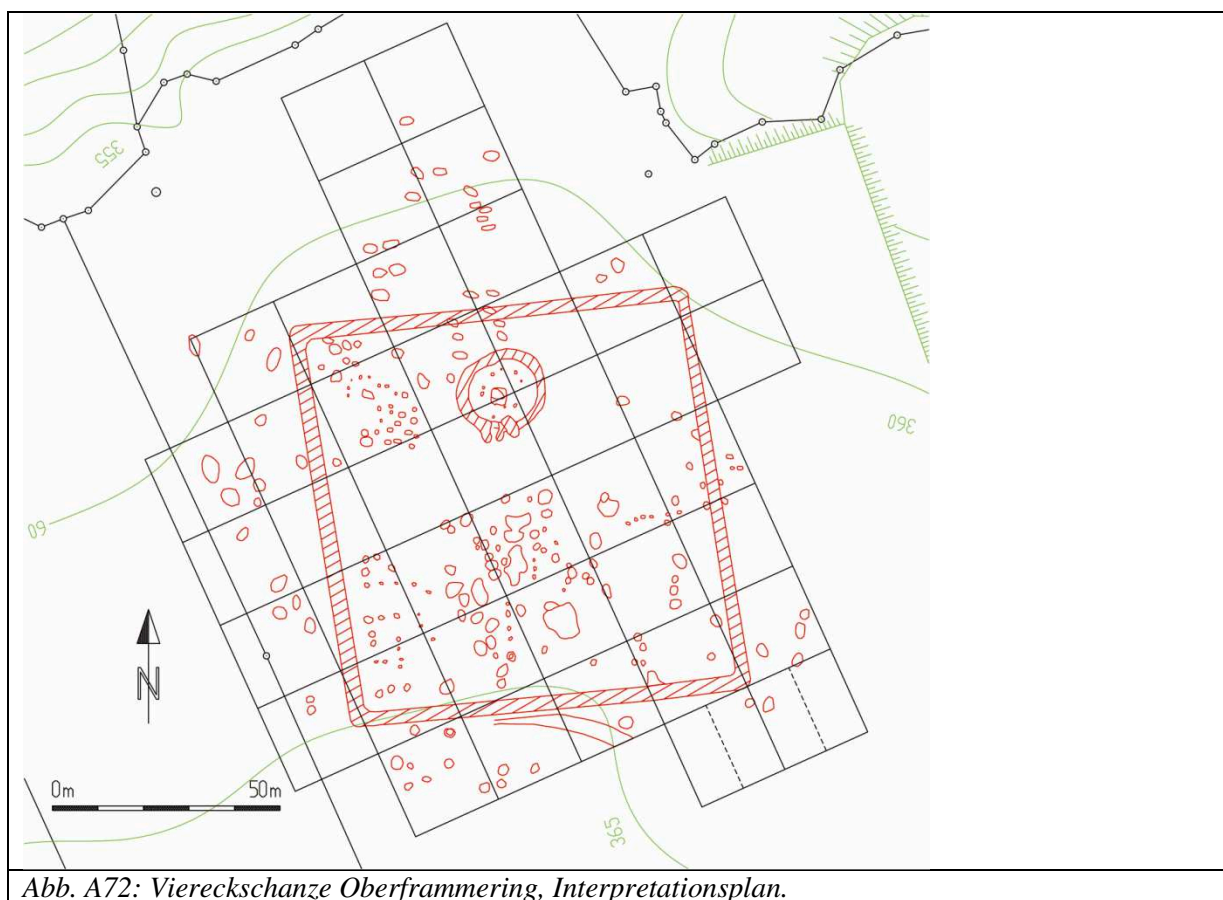
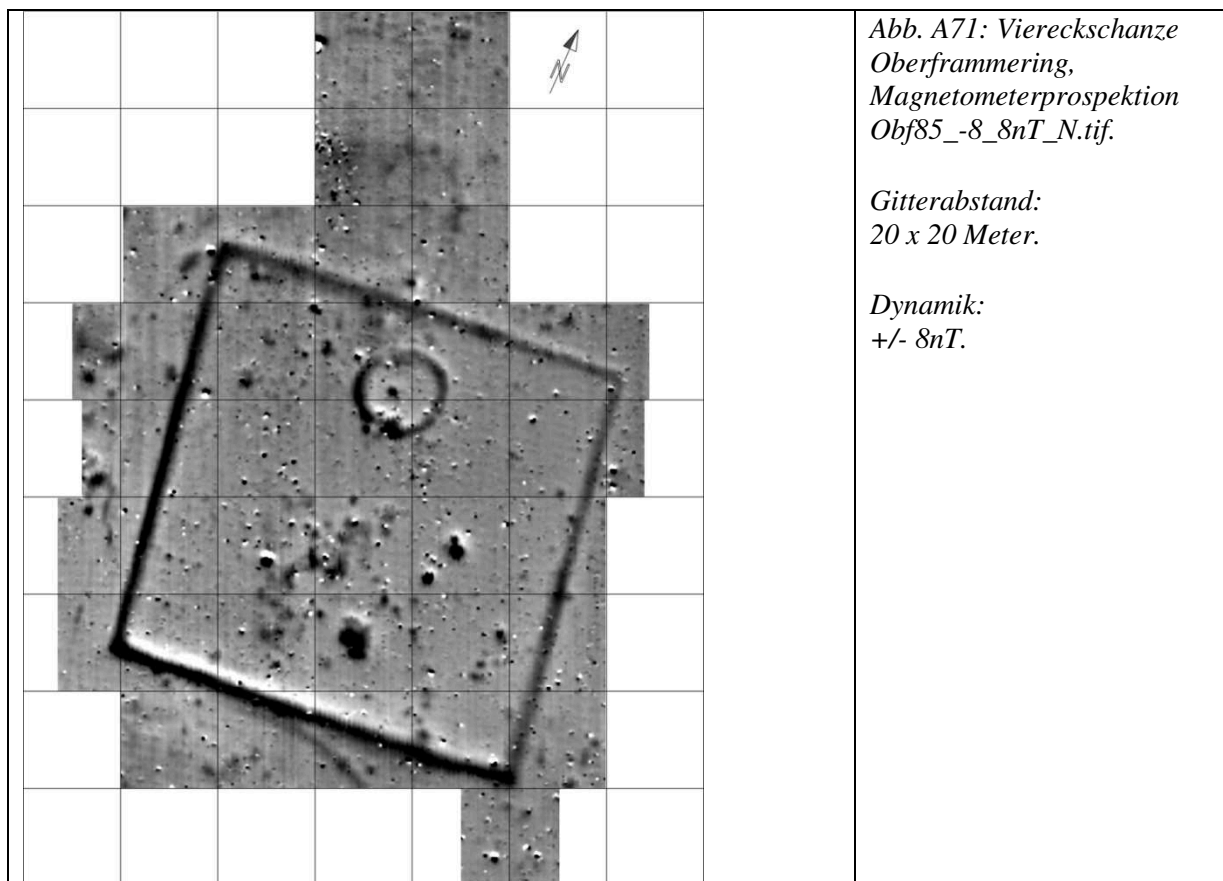


Abb. A69: Viereckschanze Pfeffenhausen, Interpretationsplan.
Befunde der Magnetometerprospektion: Rot: keltisch, gelb: neolithisch.

24	Oberframmering
Lage	Niederbayern, Lkr. Dingolfing-Landau, Gde. Landau a. d. Isar, Gmkg. Frammering
BLfD Luftbildnummer	L 7342/018
BLfD Fundstellenummer	D-2-7342-0136 / M-2009-1037
Gauß-Krüger-Koord.	4553551, 5393924
Geologie	Dungau, Unteres Isartal. Löß, Lößlehm, Decklehm, z.T. Fließerde - vorwiegend Schluff bzw. Lehm.
Boden	Pararendzina aus carbonatreichem Löß.
Geländebeschreibung	Lage an leichtem Nordhang. Etwa 60 Meter nördlich der Anlage Abbruch zur 100 Meter entfernt gelegenen Isar. Im Magnetogramm erkennbarer Wasserzulauf zum Graben von Süden her.
Erhaltungszustand	Verebnet.
Nutzung aktuell	Landwirtschaft
Uraufnahme (1827)	Landwirtschaft
Bemerkungen	Verebnete spätlatènezeitliche Viereckschanze und frühmittelalterliche Körpergräber der Merowingerzeit.
Zeitraum der Prospektion	1995
Prospektiert von:	Faßbinder
Literatur	BRAASCH [1984] – SCHMOTZ [1998] – FABBINDER & IRLINGER [1996] – IRLINGER & KREINER [1998]



Abb. A70: Viereckschanze Oberframmering, BLfD Luftbild Nr. 7342_018_8790_12 vom 23.06.2003, Fotograf: K. Leidorf. Blickrichtung von Osten.



25	Fehmbach
Lage	Niederbayern, Lkr. Deggendorf, Gde. Stephansposching, Gmkg. Steinkirchen
BLfD Luftbildnummer	L 7142/141
BLfD Fundstellenummer	D-2-7143-0108 / M-2009-1012
Gauß-Krüger-Koord.	4564606, 5410346
Geologie	Donauaue – Regensburg/Straubing. Ablagerungen im Auenbereich, meist jungholozän, und polygenetische Talfüllung, z.T. würmzeitlich - Mergel, Lehm, Sand, Kies.
Boden	Bodenkarte 1:500.000: stark sandiger Lehm bis lehmiger Sand, geröllreich, auf Schotter (überwiegend Kalkgerölle)
Geländebeschreibung	Relativ eben, leicht nach Norden abfallend. Auf Hochterrasse der 1400 Meter nördlich gelegenen Donau.
Erhaltungszustand	Zum Zeitpunkt der Prospektion: Verebnet. Mittlerweile fast vollständig ausgegraben, teilweise wassergefüllte Kiesabbaufläche.
Nutzung aktuell Uraufnahme (1827)	Bis vor kurzem Landwirtschaft bzw. Brachland. Kiesabbau. Landwirtschaft
Bemerkungen	Ausgrabung der Viereckschanze im Jahr 2000 (Westteil) sowie 2008 (Ostteil) durch Kreisarchäologie Deggendorf
Zeitraum der Prospektion	29.05.2008 / 11.11.2008
Prospektiert von:	Fl. Becker, Berghausen, Deller
Literatur	BVGB [1991] – SCHMOTZ [2002] – BVGB [2004] – BERGHAUSEN [2009] – BERGHAUSEN [2010a]



Abb. A73: Viereckschanze Fehmbach während der Grabung des westlichen Teils der Anlage. BLfD Luftbild Nr. 7142_141_8314_24 vom 09.09.2000, Fotograf: K. Leidorf. Blickrichtung von Norden.

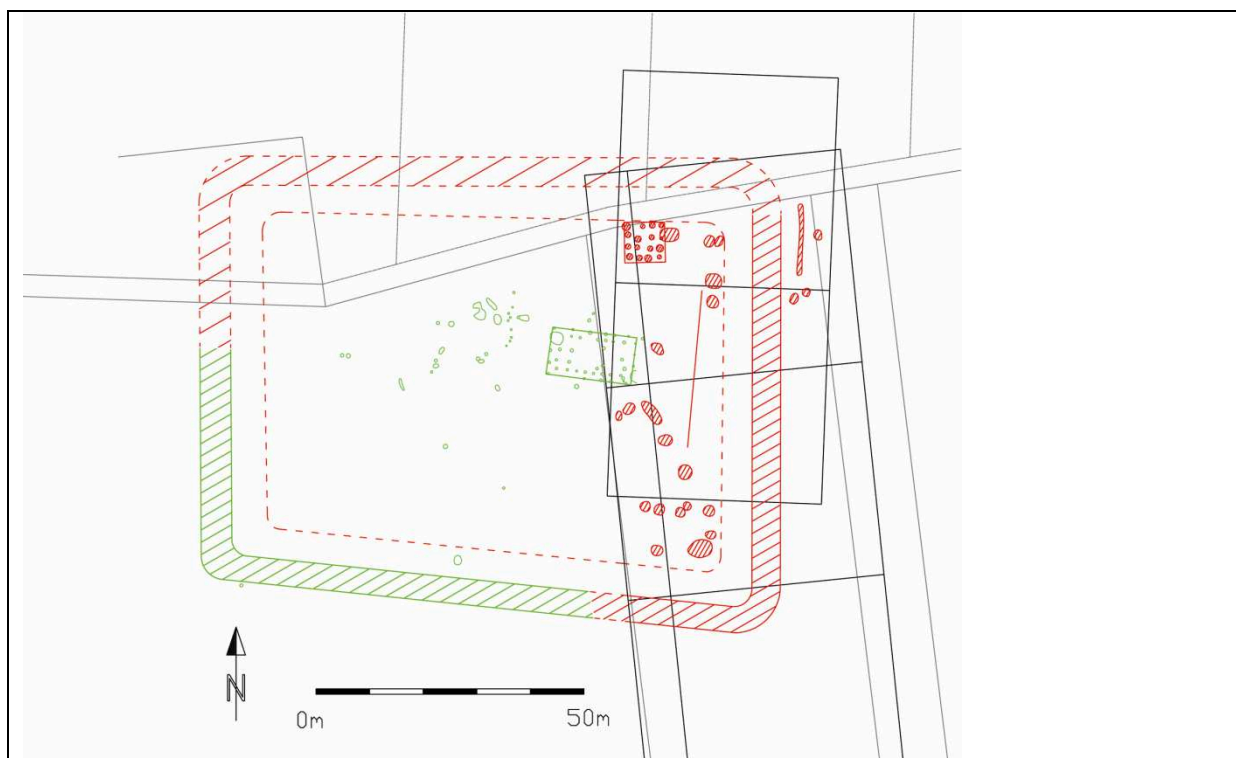
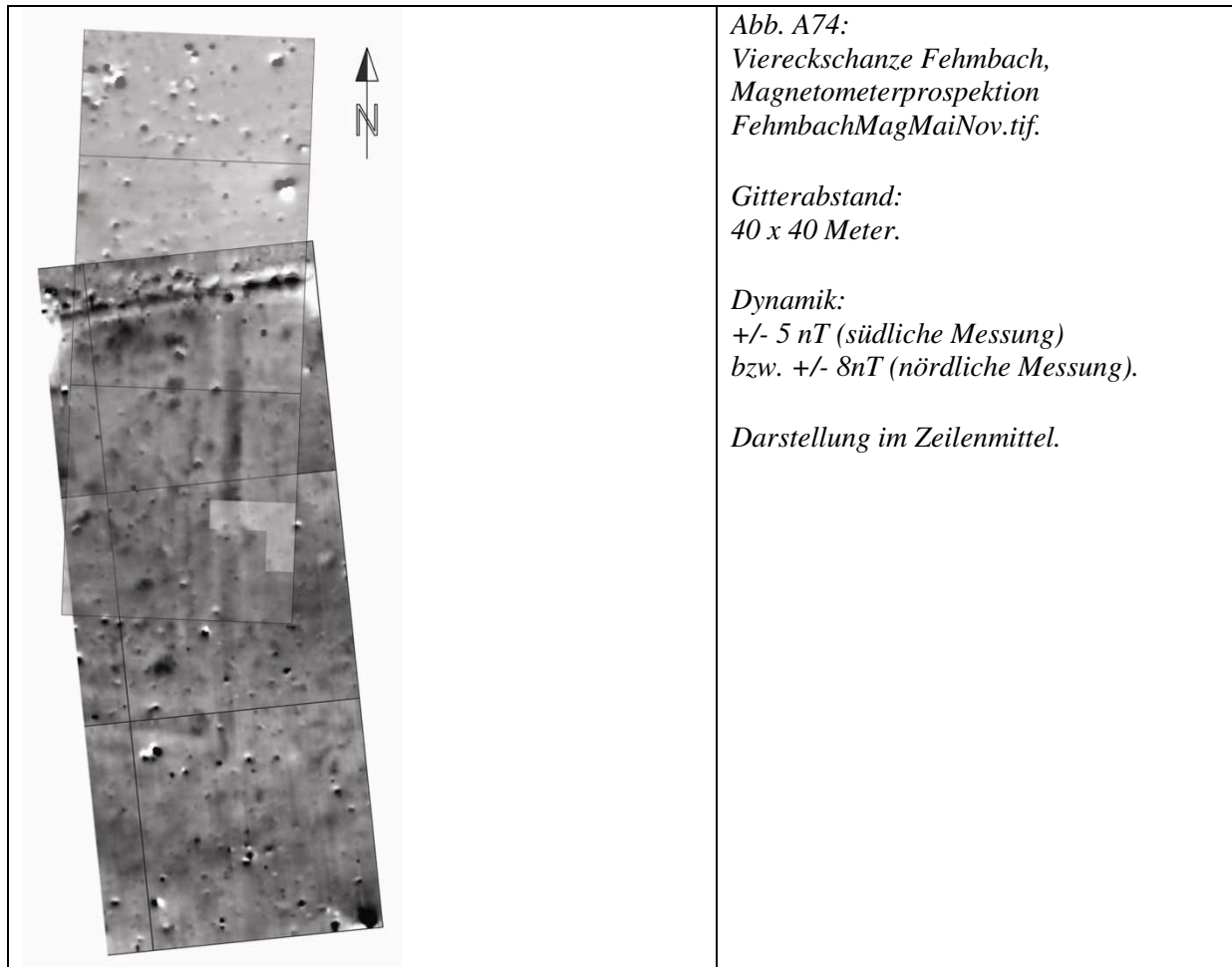


Abb. A75: Viereckschanze Fehmbach, Interpretationsplan.
Grün: Ergebnisse der Grabung, rot: Ergebnisse der Magnetometerprospektion.

26	Plattling-Pankofen
Lage	Niederbayern, Lkr. Deggendorf, Gde. Plattling, Gmkg. Pankofen
BLfD Luftbildnummer	L 7342/212-2,3
BLfD Fundstellenummer	E-2007-8841 / M-2009-1049
Gauß-Krüger-Koord.	4565832, 5406059
Geologie	Dungau, Unteres Isartal. Schotter, würmzeitlich - Kies, sandig.
Boden	Parabraunerde aus carbonatreichen Schottern und Feinsedimenten.
Geländebeschreibung	Relativ eben. Wasserlauf (Plattlinger Mühlbach) 300 Meter südlich der Anlage.
Erhaltungszustand	Zum Zeitpunkt der Prospektion: verebnet.
Nutzung aktuell	Ausgegraben, überbaut; vorher Landwirtschaft
Uraufnahme (1827)	Landwirtschaft
Zeitraum der Prospektion	1993
Prospektiert von:	Faßbinder
Literatur	REICHENBERGER & SCHAICH [1995] – SCHAICH [1995] – REICHENBERGER & SCHAICH [1996] – BVGB [1997] – FAßBINDER [2005]



Abb. A76: Viereckschanze Plattling-Pankofen, BLfD Luftbild Nr. 7342_212_7247_3 vom 05.03.1995, Fotograf: O. Braasch. Blickrichtung von Südosten.

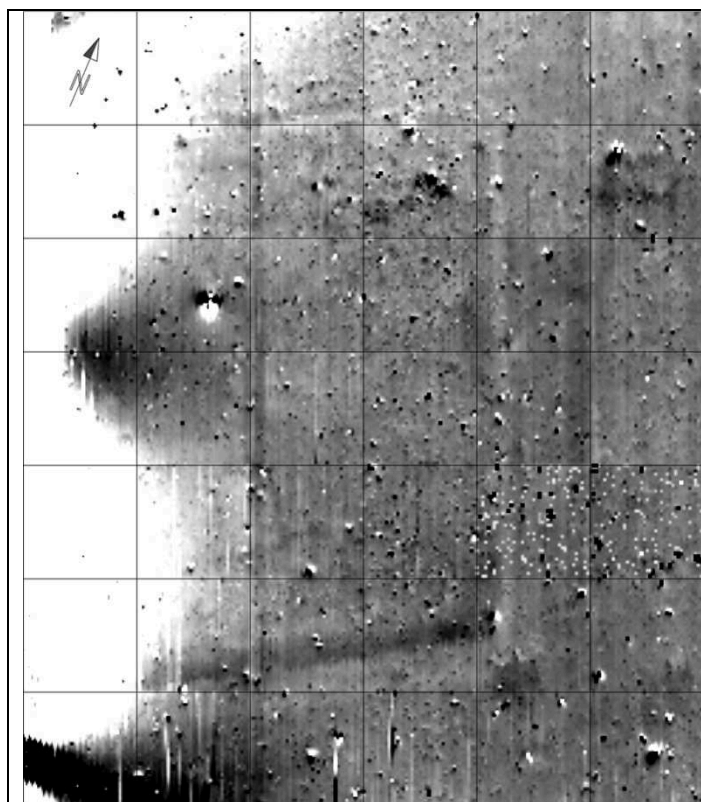


Abb. A77:
Viereckschanze Plattling-Pankofen,
Magnetometerprospektion
Pa93d_-4_4nT_N.tif.

Gitterabstand:
20 x 20 Meter.

Dynamik:
+/- 4nT.

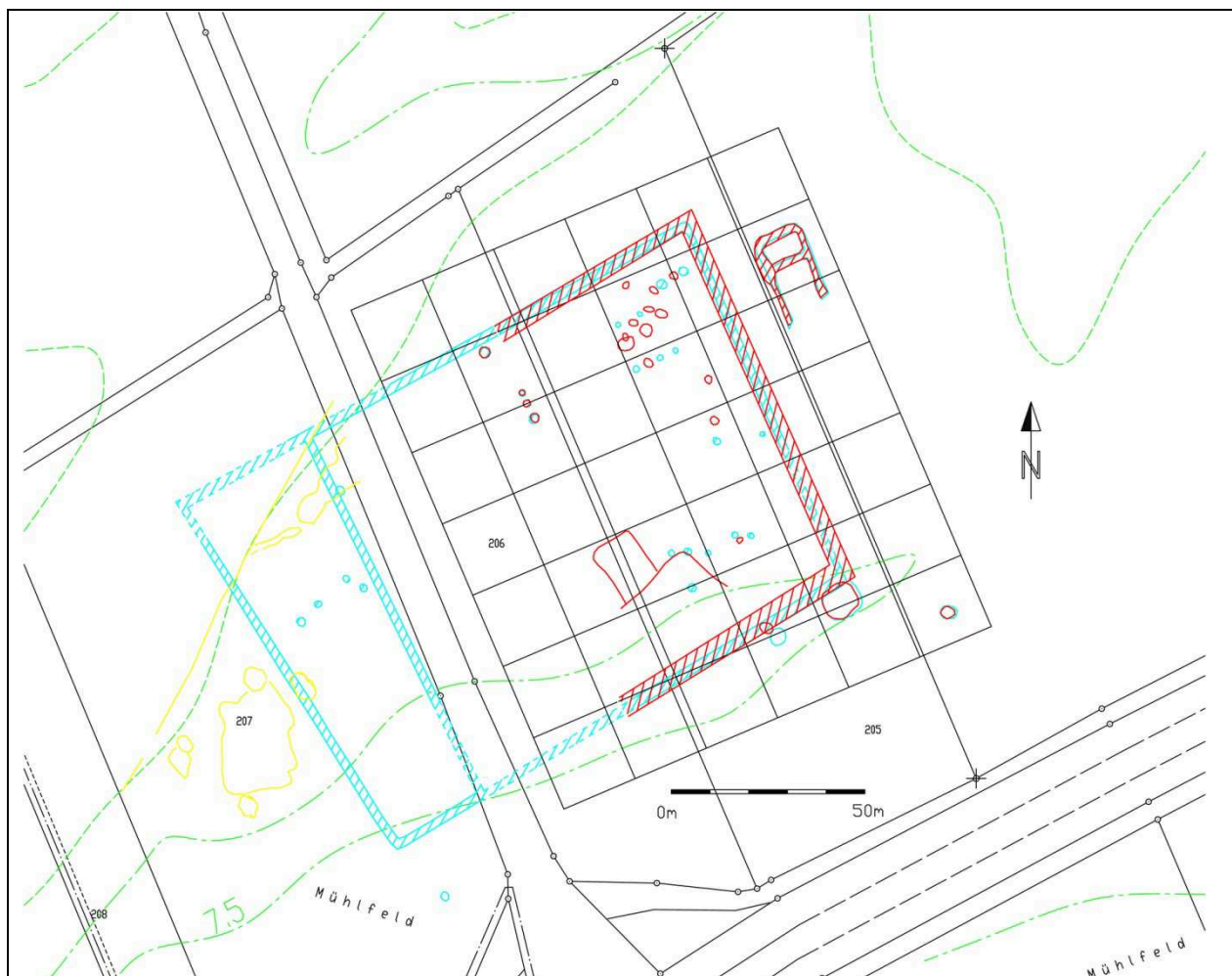


Abb. A78: Viereckschanze Plattling-Pankofen, Interpretationsplan.

Rot: Ergebnisse der Magnetometerprospektion, blau: Ergebnisse der Grabung, gelb: Geologie.

27	Manndorf
Lage	Niederbayern, Lkr. Deggendorf, Gde. Buchhofen, Gmkg. Ottmaring
BLfD Luftbildnummer	L 7342/176
BLfD Fundstellenummer	D-2-7243-0105 / M-2009-1048
Gauß-Krüger-Koord.	4569920, 5396860
Geologie	Dungau, mäßig feucht. Löß, Lößlehm, Decklehm, z.T. Fließerde - vorwiegend Schluff bzw. Lehm.
Boden	Parabraunerde und Braunerde aus Lößlehm über carbonatreichem Löß.
Geländebeschreibung	Relativ eben. Wasserlauf 700 Meter südlich der Schanze.
Erhaltungszustand	Verebnet.
Nutzung aktuell	Landwirtschaft
Uraufnahme (1827)	Landwirtschaft
Bemerkungen	Der nördlich des Feldwegs gelegene Teil der Anlage ist bereits in der Uraufnahme verschwunden bzw. unterteilt, südlich des Weges noch als Flureinheit erkennbar.
Zeitraum der Prospektion	24.10.2006 / 11.-12.04.2007
Prospektiert von:	Berghausen
Literatur	IRLINGER [1996a] – SCHMOTZ [1998] – BERGHAUSEN [2008]

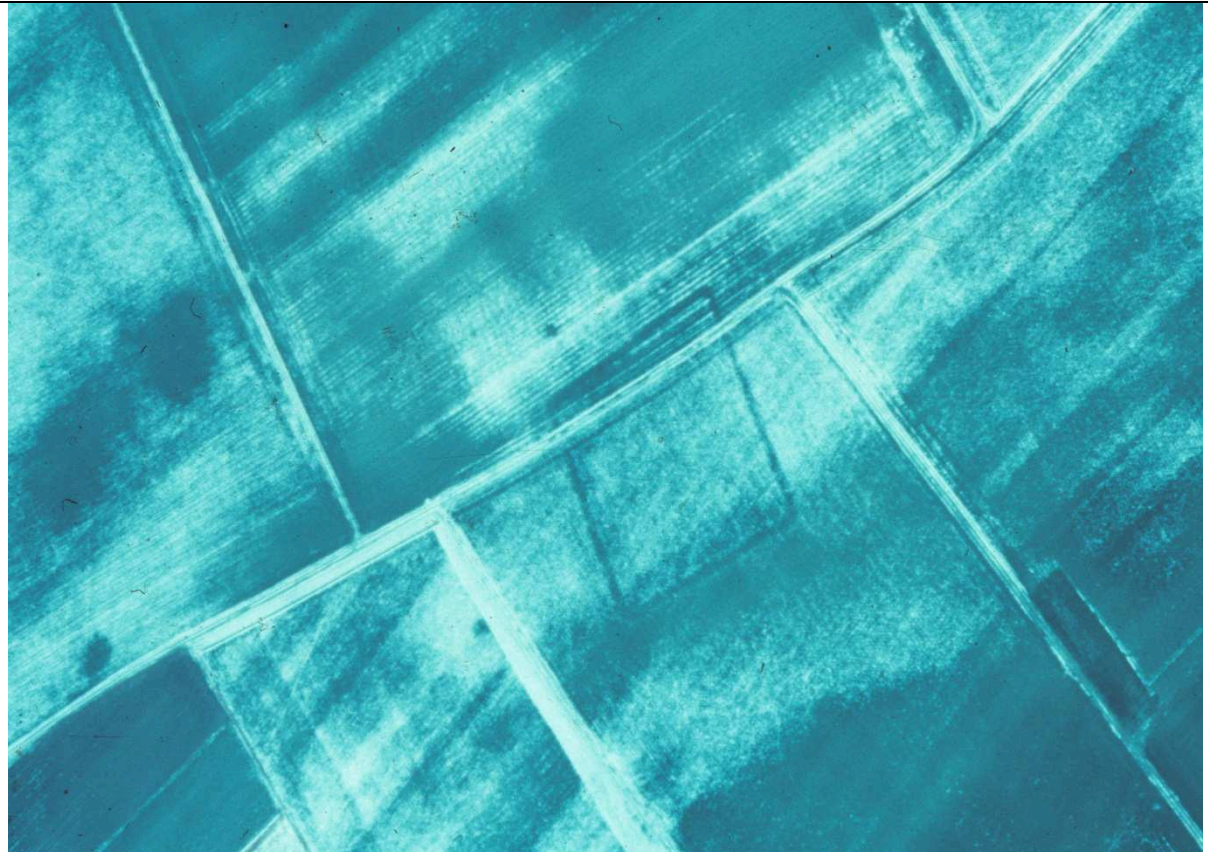


Abb. A79: Viereckschanze Manndorf, BLfD Luftbild Nr. 7342_176_4179_35 vom 04.12.1985, Fotograf: O. Braasch. Blickrichtung von Südwesten.

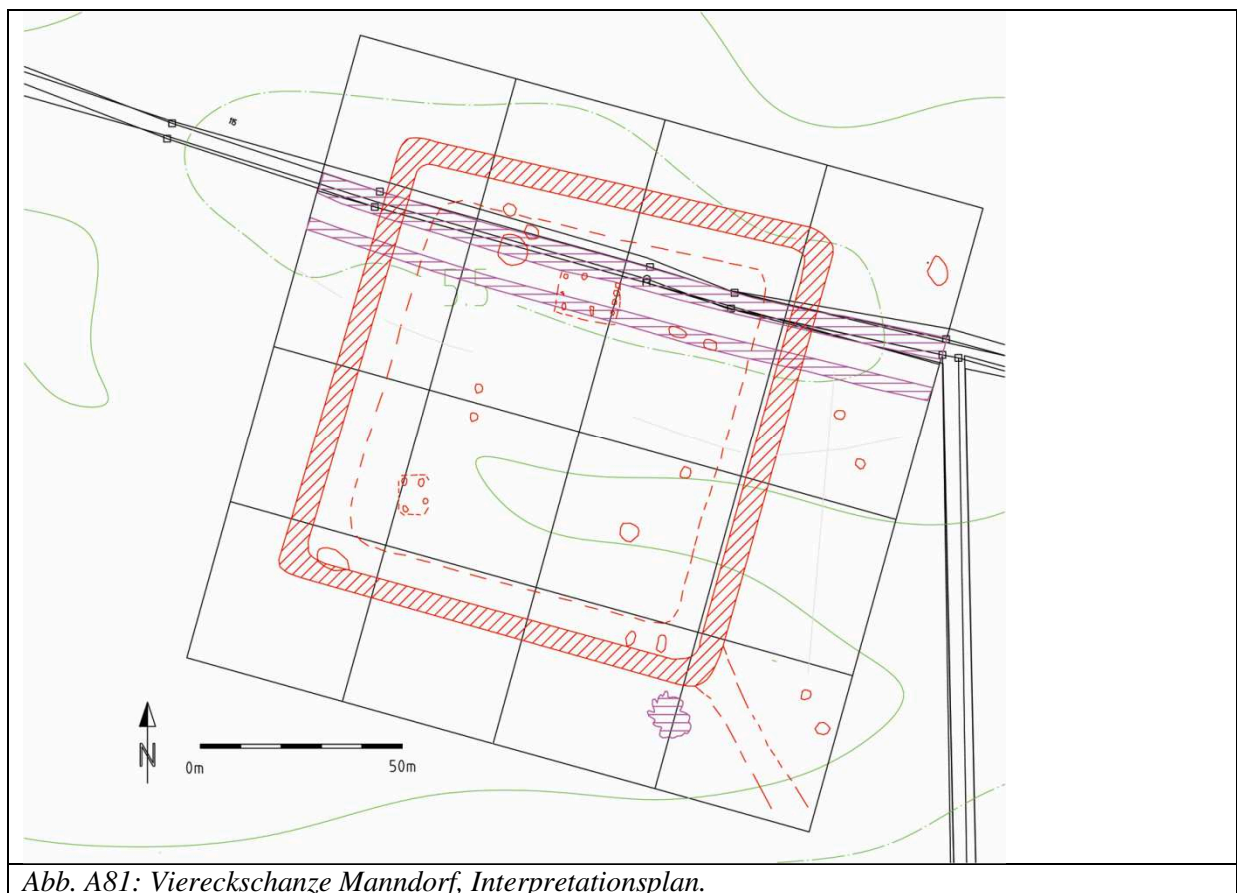
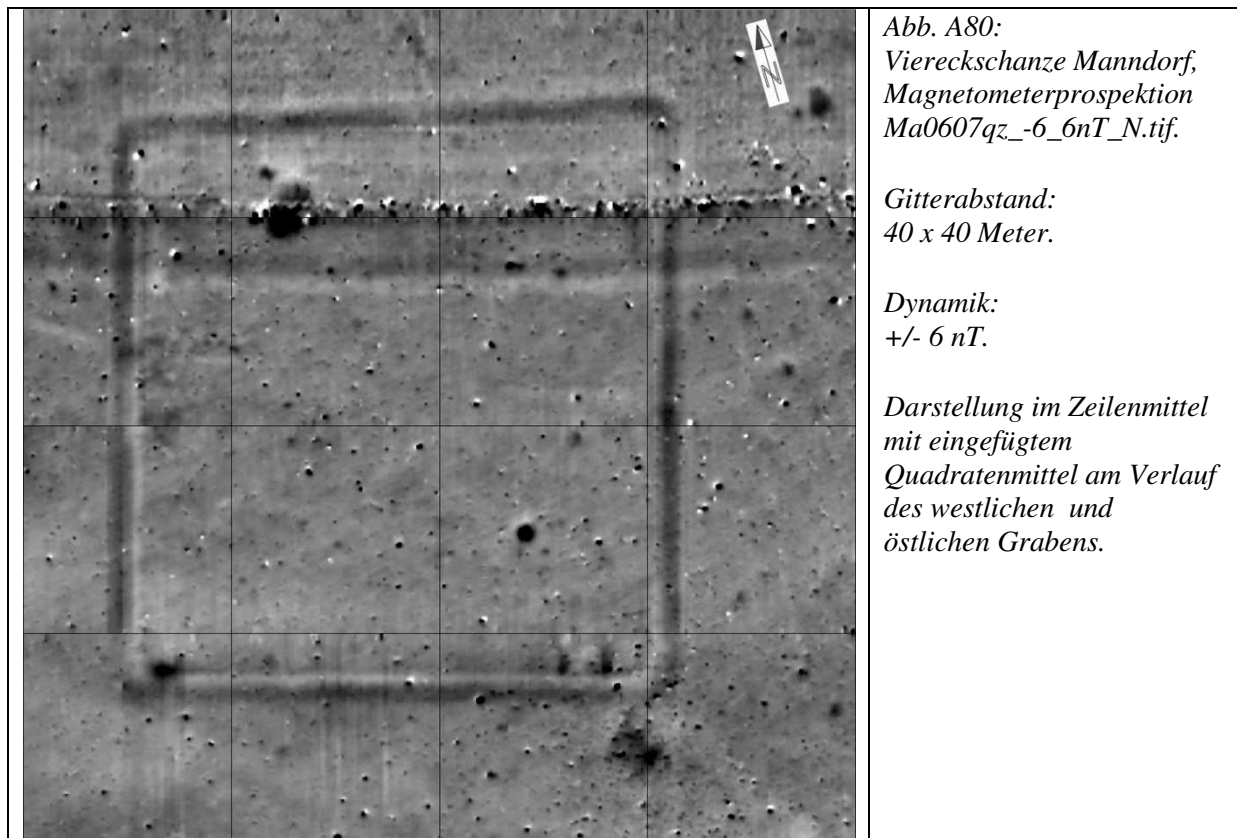


Abb. A81: Viereckschanze Manndorf, Interpretationsplan.

Danksagung

Sehr herzlich bedanken möchte ich mich zunächst bei den Betreuern dieser Arbeit, Prof. Dr. Heinrich Chr. Soffel und PD Dr. Jörg W. E. Faßbinder, bei denen ich stets ein offenes Ohr für feld- und gesteinsmagnetische Überlegungen fand, sowie bei Dr. Walter Irlinger für die Hilfe bei archäologischen Fragestellungen über Viereckschanzen.

An der Universität München:

Ich bedanke mich vielmals bei Prof. Dr. Hans-Peter Bunge für Bereitstellung eines Arbeitsplatzes am Institut für Geophysik, bei Prof. Dr. Stuart Gilder und Prof. Dr. Nikolai Petersen für die Möglichkeit, das gesteins- und paläomagnetische Labor in Niederlippach und die VFTB-Geräte in München zu nutzen, sowie bei Manuela Weiß für tatkräftige und geduldige Hilfe in Niederlippach.

Am Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege:

Bedanken möchte ich mich bei Prof. Dr. C. Sebastian Sommer und Dr. Matthias Exner für ihr Interesse am Fortschreiten der Arbeit. Vielfältige Unterstützung fand ich bei Mitarbeitern und Zivildienstleistenden des BLfD, insbesondere bei Josef Lichtenauer, Dr. Roland Linck, Dr. Tomasz Gorka, Thomas Deller, Lena Kühne, Ulf Händler, Norbert Reiche, Peter Weinzierl und Eduard Lorenz. Herzlichen Dank für die offene und freundschaftliche Zusammenarbeit!

Ein besonderer Dank gilt auch Harald Krause M. A. für die gemeinsame Arbeit an der Grabung der Viereckschanze Papferding sowie für die Unterstützung bei der Erstellung von Bodenprofilen. Viele anregende Gespräche und Diskussionen führten zum fruchtbaren interdisziplinären Austausch zwischen Archäologie und Geophysik.

Ich bedanke mich bei den Eigentümern und Pächtern der Messflächen, die bereitwillig und interessiert den Untersuchungen auf ihren Grundstücken zustimmten.

Schließlich, last but not least, danke ich meiner Familie für ihre Geduld, ihre Motivation und Unterstützung.

