
GEOPHYSIKALISCHE GELÄNDEÜBUNGEN

SS 2016

Magnetik

MESSSTANDORT RIEDHEIM A59/1

17. MAI 2016

ANN-KATHRIN EDRICH UND ALICIA ROHNACHER

BETREUER: SVENJA SCHANENG UND TILMAN METZ

Bei Rückfragen bitte an a.edrich@web.de und alicia@rohnacher.de wenden.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Theorie	2
2.1 Einführung der relevanten Größen	2
2.2 Physikalische Grundlagen	2
2.3 Das Erdmagnetfeld	6
2.4 Messgeräte	7
2.4.1 Torsions-Magnetometer	7
2.4.2 Protonen-Präzessions-Magnetometer	8
2.4.3 Fluxgate-Magnetometer	9
2.4.4 Gradiometer	10
2.5 Auswertungsschritte	10
3 Versuchsaufbau und -durchführung	12
4 Auswertung	15
4.1 Bestimmung des Kalibrierungsfaktors und des Tagesgangs	15
4.2 Auswertung von Profil B	16
4.3 Auswertung von Profil C	20
4.4 Auswertung von Profil D	21
4.5 Auswertung der Kartierung	22
4.6 Modellierung mit Matlab	23
5 Interpretation	26
6 Fehlerbetrachtung	31
7 Zusammenfassung	36
A Anhang	iv

1 Einleitung

Dieses Protokoll beschäftigt sich mit der Magnetikmessung am 17.05.2016 am Standort A59/1 Riedheim. Der Versuch wurde unter dem Ziel durchgeführt einen Basaltgang im Untergrund zu lokalisieren und mögliche Modelle für seine Ausdehnung, Lage und den Verlauf zu finden. Die Magnetik basiert darauf lokale Anomalien des messbaren Magnetfeldes zu erfassen, die durch Störkörper im Untergrund verursacht werden.

2 Theorie

2.1 Einführung der relevanten Größen

Zu Beginn sollen die relevanten Größen und die dazugehörigen Einheiten eingeführt werden. Diese können Tabelle 1 entnommen werden. Die physikalische

Tabelle 1: Relevante Größen und ihre Einheiten

Formelzeichen	Größe	Einheit
\vec{B}	magnetische Flussdichte	1 T
$T = \vec{B} $	Totalintensität	1 T
\vec{H}	magnetische Feldstärke	$1 \frac{A}{m}$
\vec{M}	Magnetisierung	$1 \frac{A}{m}$
D	Deklination	° (Grad)
I	Inklination	° (Grad)
\vec{D}	Drehmoment	1 Nm
\vec{m}	magnetisches Moment	1 Am^2
\vec{H}_0 bzw. H_0	Horizontalkomponente	1T
\vec{X}, \vec{Y} bzw. X, Y	Nord-/Ostkomponente	1T
\vec{B}_z bzw. B_z	Vertikalkomponente	1T

Bedeutung der Größen wird im folgenden Theorieteil erläutert.

Weiterhin relevant sind die in Tabelle 2 aufgeführten Konstanten und Materialparameter.

Tabelle 2: Relevante Konstanten und Materialparameter

Formelzeichen	Bezeichnung	Größe
μ_0	magnetische Feldkonstante	$4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$
μ	magnetische Permeabilität	Materialabhängig, in $\frac{Vs}{Am}$
κ	magnetische Suszeptibilität	Materialabhängig, ohne Einheit

2.2 Physikalische Grundlagen

Ein Grundsatz der Magnetik ist, dass es keine magnetischen Monopole gibt, sondern dass ein magnetischer Körper immer zwei Pole, einen Nord- und einen Südpol hat. Das Magnetfeld verläuft vom Nordpol zum Südpol. Die Richtung des Magnetfeldes wird durch Feldlinien angegeben. Das Magnetfeld \vec{B} wird erzeugt

durch die magnetische Feldstärke (auch magnetische Erregung) \vec{H} und die materialabhängige Magnetisierung \vec{M} des Körpers, in dem das Magnetfeld bestimmt werden soll. Es gilt

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}). \quad (1)$$

[1] Dabei ist μ die magnetische Permeabilität des Mediums (siehe Tabelle 2), die die Durchlässigkeit des Materials für Magnetfelder quantifiziert [4]. μ_0 ist die magnetische Feldkonstante (siehe Tabelle 2), die die magnetische Permeabilität des Vakuums angibt. Die Magnetisierung \vec{M} (siehe Tabelle 2) beschreibt das induzierte Magnetfeld durch die Magnetisierung eines Körpers durch ein anliegendes Magnetfeld. Der Unterschied zwischen \vec{B} und \vec{H} besteht darin, dass die magnetische Flussdichte \vec{B} die eigentliche Messgröße ist, die die Stärke des resultierenden Magnetfelds liefert und die magnetische Feldstärke \vec{H} die Stärke des magnetisierenden Feldes angibt [1]. Der Betrag der magnetischen Flussdichte, auch Totalintensität T , lässt sich anschaulich auch als die Anzahl der Feldlinien pro Querschnittsflächeneinheit beschreiben [2].

Die Magnetisierung setzt sich zusammen aus der remanenten Magnetisierung \vec{M}_{rem} , die den Anteil der Magnetisierung ohne anliegendes äußeres Magnetfeld beschreibt und der induzierten Magnetisierung \vec{M}_{ind} , die durch das Anlegen eines äußeren Magnetfelds entsteht. Es gilt

$$\vec{M} = \vec{M}_{rem} + \vec{M}_{ind} = \kappa \vec{H} + \vec{M}_{rem}. \quad (2)$$

[2] mit der magnetischen Suszeptibilität κ , die die Fähigkeit der Magnetisierung eines Material beim Anlegen eines äußeren Magnetfeldes beschreibt. [3]

Bei der Messung im Gelände ist nicht offensichtlich ob die Magnetisierung, die gemessen wird, remanent oder induziert ist. In diesem Protokoll wird davon ausgegangen, dass der Störkörper nur eine induzierte Magnetisierung besitzt [5].

Der lineare Zusammenhang in Gleichung (2) ist nicht gültig für hohe \vec{H} , da sich \vec{M} einer Sättigung nähert, was bedeutet, dass sich die Magnetisierung bei steigendem \vec{H} nicht mehr ändert. Auch das Magnetfeld \vec{B} nähert sich einer Sättigung bei großem \vec{H} [2]. Grund hierfür ist, dass Magnetisierung durch die Polarisation von Elementarmagneten im inneren eines Körpers erreicht wird. Da es aber nicht unbegrenzt Elementarmagneten im inneren eines Körpers gibt, tritt irgendwann die Sättigung ein [2]. Dieses Prinzip nutzt auch das Fluxgate-Magnetometer (siehe Abschnitt Messgeräte) [5].

Befindet sich ein Störkörper in einem homogenen Hintergrundfeld ergibt sich das resultierende Magnetfeld \vec{B}_{res} als Überlagerung der beiden Felder. Abhängig von

der Art der Magnetisierbarkeit des Störkörpers ergibt sich ein anderes resultierendes Magnetfeld. Es wird zwischen verschiedenen Arten der Magnetisierbarkeit unterschieden. Zum einen gibt es para- und diamagnetische Stoffe. Diese Stoffe zeichnen sich dadurch aus, dass sie nur magnetisiert sind, wenn sie sich in einem äußeren Magnetfeld befinden. Verschwindet dieses Magnetfeld, verschwindet auch die Magnetisierung. Der Unterschied zwischen diesen beiden Formen ist die Richtung der Magnetisierung. In paramagnetischen Stoffen kommt es zu einer Verstärkung des Magnetfeldes, weil sich die Elementarmagneten in Richtung des anliegenden Feldes ausrichten, während in diamagnetischen Stoffen das Magnetfeld abgeschwächt wird, da die Elementarmagneten sich antiparallel zum äußeren Magnetfeld ausrichtet. Bei magnetischen Mineralen ist die Magnetisierbarkeit meist ferrimagnetisch. Bei ferrimagnetischen Stoffen ist die Suszeptibilität abhängig von der Vorgeschichte des Stoffes und des magnetisierenden Feldes. Diese Stoffe behalten nach dem Abschalten des äußeren Magnetfeldes eine remanente Magnetisierung [1].

Auf einen Körper mit magnetischem Moment \vec{m} und Auslenkung aus der Ruhelage ϕ in Grad in einem äußeren Magnetfeld mit magnetischer Flussdichte \vec{B} wirkt eine Kraft und ein Drehmoment

$$\vec{D} = \vec{m} \times \vec{B} = B \cdot m \cdot \sin(\phi). \quad (3)$$

Das Drehmoment führt dazu, dass der Körper bestrebt ist sich tangential zu den Feldlinien auszurichten. Das magnetische Moment eines Körpers ergibt sich wie folgt zu

$$\vec{m} = \int_V \vec{M}(\vec{x}) dV, \quad (4)$$

wobei $\vec{M}(\vec{x})$ die nicht-konstante Magnetisierung und dV das Volumenelement des Störkörpers beschreibt [5].

Das Magnetfeld \vec{B} ist ein Vektorfeld und kann mit Hilfe von mindestens drei voneinander unabhängigen Komponenten beschrieben werden. Abbildung 1 zeigt die verschiedenen zur Verfügung stehenden Komponenten des Magnetfelds. \vec{X} und \vec{Y} beschreiben die geographischen Nord- und Ostkomponenten, D die Deklination und I die Inklation. Die Inklation gibt an unter welchem Winkel die magnetischen Feldlinien auf der Erde auftreffen, während die Deklination den Winkel zwischen geographisch Nord und magnetisch Nord angibt [1]. Die Deklination ist global betrachtet nicht konstant [6]. Zusammen beschreiben Deklination und Inklation den Verlauf der magnetischen Feldlinien. Weiterhin kann \vec{B} über die Horizontalkomponente \vec{H}_0 ($H_0 \neq |\vec{H}|$), die Vertikalkomponenten \vec{B}_z (in Abbil-

dung 1 \vec{Z}) und die Totalintensität T beschrieben werden. Im folgenden werden die Zusammenhänge der einzelnen Komponenten dargestellt.

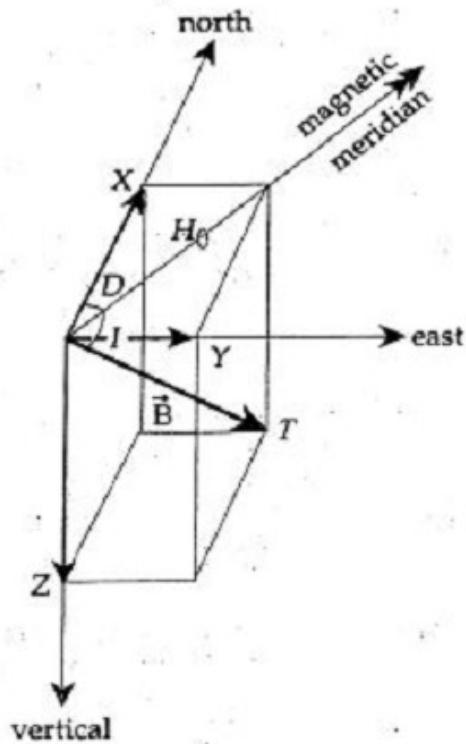


Abbildung 1: Komponenten des Magnetfeldes: T entspricht dem Betrag der magnetischen Flussdichte, \vec{X} und \vec{Y} sind die geographischen Nord- und Ostkomponenten, D und I sind Deklination und Inklinationswinkel und H_0 und B_z (hier \vec{Z}) ist die Horizontal- bzw. Vertikalkomponente [1]

Mit $|\vec{X}| = X$, $|\vec{Y}| = Y$ und $|\vec{B}_z| = B_z$ gilt

$$T^2 = X^2 + Y^2 + B_z^2 = H_0^2 + B_z^2 \quad (5)$$

$$H_0 = T \cos(I) \quad (6)$$

$$B_z = T \sin(I) \quad (7)$$

$$\tan(D) = \frac{Y}{X} \quad (8)$$

$$\tan(I) = \frac{B_z}{H_0} \quad (9)$$

[1, 5].

2.3 Das Erdmagnetfeld

In dem hier betrachteten Fall ist das im vorherigen Abschnitt eingeführte homogene Hintergrundfeld das Erdmagnetfeld, das in der Dimension, in dem wir es betrachten tatsächlich als homogen angenommen werden kann und der Störkörper ist der Basaltgang im Untergrund. Das magnetische Moment des Erdmagnetfelds beträgt $m = |\vec{m}| = 8 \cdot 10^{22} \text{ Am}^2$ [5]. Das Erdmagnetfeld wirkt wie eine Schutzhülle um die Erde, die beispielweise kosmische Korpuskularstrahlung abhält [2]. Carl Friedrich Gauß entwickelt das Erdmagnetfeld nach Kugelfunktionen, wodurch das Magnetfeld auch an Orten, an denen keine Messwerte zur Verfügung stehen, bestimmt werden kann. Er konnte zeigen, dass der Ursprung des Erdmagnetfeldes zu einem großen Teil, etwa 94%, im Erdinneren liegt. Die anderen 6% stammen beispielsweise aus dem magnetischen Krustenfeld. Die niedrigen Terme der Kugelfunktionsentwicklung zeigen, dass das Erdmagnetfeld etwa zu 80% dem Magnetfeld eines Stabmagneten gleicht. Die Achse dieses gedachten Stabmagneten im Erdinneren stimmt nicht genau mit der Rotationsachse der Erde überein, sondern ist ihr gegenüber um 11.5° verkippt. Dabei liegt der magnetische Südpol in der Nähe des geographischen Nordpols und der magnetische Nordpol in der Nähe des geographischen Südpols. Die magnetischen Pole zeichnen sich dadurch aus, dass die Magnetfeldlinien dort senkrecht auftreffen, also die Inklination genau 90° beträgt. Die restlichen 20% des Erdmagnetfelds entsprechen höheren Termen der Entwicklung. Diese Anteile sind im besonderem Maße zeitlichen Änderungen unterworfen. Es ist beobachtbar, dass die Nicht-Dipolanteile einem Westwärtsdrift unterliegen [2, 5]. Dabei ändert sich die Deklination ungefähr um 0.3 Längengrad pro Jahr was einer Bewegungsgeschwindigkeit von $30 \frac{\text{km}}{\text{Jahr}}$ entspricht. Anhand der remanenten Magnetisierung in Gesteinen, wie beispielsweise das magnetische Streifenmuster am mittelozeanischen Rücken, wird deutlich, dass das Erdmagnetfeld sich im Laufe der Jahrtausende in unregelmäßigen Zeitabständen vollständig umgepolt hat. Außerdem unterliegt das Magnetfeld starken Intensitätsschwankungen. In den letzten 2000 Jahren ist die Stärke des Magnetfeldes auf die Hälfte abgesunken [2]. Das Erdmagnetfeld unterliegt auch Variationen, die sich auf deutlich geringeren Zeitskalen abspielen. Beispielsweise ist bei der Auswertung einer Magnetikmessung ein Tagesgang und die Änderungen der Partikelströme der Sonne, die zusammen etwa täglich 30 nT ausmachen, oder magnetische Stürme, die zu einer Änderung bis zu 1000 nT führen können, zu berücksichtigen. Weiterhin ist beim Erdmagnetfeld zu beachten, dass die Position auf der Erde einen entscheidenden Einfluss auf die Stärke des Erdmagnetfelds hat. T nimmt vom Äquator zum Pol um 5 nT pro Kilometer

von 25000 nT auf 70000 nT zu. Die Änderung des Magnetfeldes mit der Höhe beträgt etwa $2\text{-}3 \frac{\text{nT}}{\text{m}}$.

Das Erdmagnetfeld hat seinen Ursprung hauptsächlich im flüssigen, zu großen Teilen aus Eisen bestehenden, äußeren Erdkern. Durch ein äußeres Initialfeld werden Konvektionsströme im äußeren Erdkern induziert, die ihrerseits wiederum ein Magnetfeld erzeugen. Dieses Prinzip schaukelt sich hoch bis das Magnetfeld entsteht, wie es heute vorliegt. Dabei gibt es Theorien nach denen diese Konvektionsströme als walzenförmig vorgestellt werden können. Diese Walzen haben unterschiedliche Polarität und die Nicht-Dipolanteile können durch Fluktuationen in der Konvektion erklärt werden. Die Geschwindigkeit der Konvektion wird mit $30 \frac{\text{km}}{\text{Jahr}}$ angenommen. Die Energie zur Aufrechterhaltung dieses Systems stammt hauptsächlich aus zwei Prozessen, nämlich zum einen der Erstarrungswärme, wenn der flüssige äußere Erdkern fest wird und durch die Zunahme der gravitativen Energie, wenn Eisen- und Nickelkristalle auf Grund ihrer höheren Dichte aus der Schmelze ausfallen und in Richtung des Kerns absinken [2].

2.4 Messgeräte

2.4.1 Torsions-Magnetometer

Bei der Messung, die in diesem Protokoll behandelt wird, wurde das Torsions-Magnetometer als Basisstation verwendet um die Änderung der Vertikalkomponente B_z des Erdmagnetfeldes im Verlauf der Messung aufzuzeichnen. Das Torsions-Magnetometer basiert, wie der Name schon andeutet, auf der Torsion eines Stabmagneten, der an zwei (vereinfachte Darstellung, in der Praxis an mehreren) Metallfäden drehbar befestigt ist. Beim Verdrehen der Fäden wirkt auf den Magneten ein mechanisches Drehmoment. Die Fäden werden verdreht mit dem Ziel das Drehmoment, das durch das äußere Feld auf den Stabmagneten wirkt, mit einem Drehmoment, das durch das verdrehen der Fäden auf den Stabmagneten wirkt, zu kompensieren. Die Kompensation ist abgeschlossen, wenn sich der Stabmagnet wieder in der Lage befindet, in der er sich befinden würde ohne äußeres anliegendes Magnetfeld. Der Torsionswinkel α in Skt um den der Stab verdreht werden muss bis diese Ruhelage erreicht ist, kann am Gerät abgelesen werden. Damit kann dann wie folgt das Drehmoment berechnet werden.

$$|\vec{D}| = \tau \cdot (\alpha - \alpha_0) \quad (10)$$

τ ist dabei die kalibrierte Torsionskonstante in $\frac{\text{kg m}^2}{\text{Skt s}^2}$ und α_0 in Skt gibt die Ruhelage des Magneten an.

Durch umstellen von Gleichung (3) und anwenden auf Gleichung (10) kann das Magnetfeld \vec{B} in Tesla berechnet werden. Dafür muss gelten $\vec{m} \perp \vec{B}$. Es ergibt sich

$$B = \frac{\tau \cdot (\alpha - \alpha_0)}{|\vec{m}|}. \quad (11)$$

$|\vec{m}|$ ist der Betrag des magnetischen Moments des Stabmagneten.

$R = \frac{\tau}{|\vec{m}|}$ ist zunächst unbekannt, kann jedoch durch das anlegen eines gut bekannten Magnetfeldes mit Hilfe eines Helmholtzspulenpaars ermittelt werden. Die Änderungen des durch die Spulen fließenden Stroms ΔI in A können über die Formel

$$\Delta B = c \cdot \Delta I \quad (12)$$

in eine Änderung des Magnetfeldes ΔB in T umgeschrieben werden. Dabei ist c die bekannte Spulenkonstante in $\frac{\text{kg}}{\text{A}^2 \text{s}^2}$. Am Gerät selber werden in Abhängigkeit der angelegten Stromstärke I die Skt abgelesen. In einem nächsten Schritt werden dann diese Skt über das Magnetfeld aufgetragen und die reziproke Steigung der Ausgleichsgerade ergibt den Kalibrierungsfaktor R in $\frac{\text{T}}{\text{Skt}}$. Der Mechanismus des Magnetometers sowie weitere Komponenten des Geräts sind stark anfällig für Temperaturschwankungen, so dass z.B. direkte Sonneneinstrahlung vermieden werden sollte. Beim Aufstellen muss darauf geachtet werden, dass das Gerät nach Norden ausgerichtet und horizontriert wird.[5, 2]

2.4.2 Protonen-Präzessions-Magnetometer

Protonen-Präzessions-Magnetometer messen die Totalintensität. Sie bestehen aus einem Behälter, der mit einer wasserstoffreichen Flüssigkeit, wie Petroleum, gefüllt ist. Dieser ist von einer Spule umwickelt. Wasserstoff ist ein einfaches Atom mit nur einem Proton im Kern, das ein magnetisches Moment einen Drehimpuls besitzt, weshalb auf das Proton ein Drehmoment nach Gleichung (3) wirkt. Das führt zu einer Präzession des Spins des Protons um eine Achse, die durch das äußere Magnetfeld bestimmt wird. Die Frequenz der Präzession ist proportional zum Ergebnis von Gleichung (3) und damit auch zum Magnetfeld.

Am Anfang sind die Präzessionen der Protonen nicht in Phase, was für ein messbares Ergebnis aber zwingend notwendig ist. Aus diesem Grund müssen sie erst polarisiert werden. Dafür fließt durch die bereits oben erwähnte Spule Gleichstrom, so dass ein Magnetfeld erzeugt wird, das das äußere Magnetfeld überlagert. Die Protonenspins richten sich dann nach dem resultierenden Magnetfeld aus. Aber auf Grund des großen Dimensionsunterschieds wirkt hauptsächlich das Magnet-

feld der Spule. Nach Abschluss dieses Vorgangs wird das Magnetfeld der Spule abgeschaltet, so dass sich eine einheitliche Präzession um die Richtung des Erdmagnetfeldes einstellt.

Vorteile des Geräts sind, dass es weitgehend unabhängig von Temperaturschwankungen ist und die Messung sehr schnell geht. Allerdings kann mit dem Gerät nicht kontinuierlich gemessen werden, da durch äußere Einflüsse die Amplitude der Präzession abnimmt. Außerdem kann das Gerät nicht bei starken Wechselfeldern verwendet werden kann, weil die Protonen auf jede Form von äußerem Feld reagieren. Die räumliche Änderung des äußeren Magnetfeldes darf ebenfalls nicht zu groß sein, sonst präzidieren die Protonen im Behälter nicht mit der selben Frequenz. Damit ist die Voraussetzung für die erfolgreiche Messung nicht erfüllt. Die Genauigkeit, die mit dem Gerät erreicht werden kann beträgt $\pm 1 \text{ nT}$ und in seltenen Fällen auch $\pm 0.1 \text{ nT}$. [5]

2.4.3 Fluxgate-Magnetometer

Das Fluxgate-Magnetometer misst die Vertikalkomponente B_z . Das Fluxgate-Magnetometer besteht in der hier verwendeten Anordnung aus zwei Weicheisenkernen und vier parallel angeordneten Spulen. Die beiden Weicheisenkerne sind von jeweils einer Spule umwickelt durch die ein entgegengesetzt gerichteter Wechselstrom fließt, wodurch sich auch zwei entgegengesetzt gerichtete Magnetfelder ergeben. Der im Abschnitt 'Physikalische Grundlagen' erwähnte lineare Zusammenhang zwischen \vec{H} und \vec{B} , der aber ab einer bestimmten magnetischen Feldstärke in ein Sättigung übergeht, bildet hier das Funktionsprinzip. Liegt kein äußeres Gleichfeld an dem Gerät an, erreichen beide Spulen gleich schnell die Sättigung. Liegt ein äußeres Gleichfeld an, führt dies dazu, dass eine der beiden Spulen früher in die Sättigung geht, als die andere. Eine weitere Spule in dem Gerät, die Sensorspule, erfährt eine Induktionsspannung, die nach dem Induktionsgesetz proportional zur Änderungsgeschwindigkeit des Gesamtflusses ist. Durch eine weitere Spule, die Rückkopplungsspule, wird Strom geleitet. Das dadurch erzeugte magnetische Feld soll gerade so groß sein, dass das äußere Magnetfeld kompensiert wird und an der Sensorspule nichts mehr registriert wird. Der Strom, der dafür durch die Rückkopplungsspule fließen muss, kann daher als Referenz für die Stärke des äußeren Magnetfeldes herangezogen werden.

Am Fluxgate-Magnetometer werden Skalenteile abgelesen, die mit der Konstante $s = 2.808 \frac{\text{nT}}{\text{SkL}}$ in die magnetische Flussdichte umgerechnet werden müssen. [5, 2]

2.4.4 Gradiometer

Das Gradiometer besteht aus zwei 3-Komponenten Fluxgate-Magnetometern, die in einem Abstand von Δz in m senkrecht übereinander angebracht sind. Das Gradiometer misst den vertikalen Gradienten B_z in $\frac{T}{m}$. Es gilt

$$\frac{\delta}{\delta z} B \approx \frac{B_u - B_o}{\Delta z}, \quad (13)$$

wobei B_u und B_o die gemessene magnetische Flussdichte an den Sonden unten und oben ist. Wird eine Anomalie im Untergrund betrachtet, wird deutlich, dass bei geringer Tiefe B_u im Maximum größer ist als B_o . In den Randbereichen ist B_o jedoch größer als B_u . Je tiefer die Anomalie liegt, desto ähnlicher werden die Werte von B_o und B_u , weshalb sich das Gradiometer besonders für oberflächennahe Strukturen eignet. Das Ergebnis, das das Gradiometer liefert ist eben gerade jene Differenz zwischen B_u und B_o .

Entscheidend für die Messung ist, dass die Vertikalkomponenten beider Fluxgate-Magnetometer gleich ausgerichtet und gleich empfindlich sind. Ansonsten kommt es zu einer Verfälschung des gemessenen vertikalen Gradienten, wenn das Gerät leicht verdreht wird. Vor der Messung werden deshalb beide internen Magnetometer außerhalb des Bereichs der Anomalie auf einander abgestimmt.

Vorteile des Gradiometers sind, dass großräumige Trends im Untergrund sowie zeitliche Variationen des Magnetfelds keinen Einfluss auf die Messung haben. [5]

2.5 Auswertungsschritte

Im folgenden werden die für die Beantwortung der Fragestellung des Versuchs notwendigen Auswertungsschritte erläutert.

Schritt 1: Auswertung der Kalibrierungskurve und Berechnung des Kalibrierungsfaktors R der Basisstation wie in Abschnitt 'Torsions-Magnetometer' beschrieben. Dann wird mit diesem Kalibrierungsfaktor die Skalenteile in die magnetische Flussdichte umgerechnet. Damit ist dann der Tagesgang bekannt und die Messwerte, die mit dem Fluxgate-Magnetometer aufgezeichnet werden können anhand der Kurve korrigiert werden. Diese Korrektur ist nur mit Magnetometern möglich, die die vertikale Komponente des Magnetfeldes erfassen. Da das Gradiometer den vertikalen Gradienten misst, ist eine Korrektur der Daten anhand des Tagesgangs nicht notwendig.

Auch die Werte des Fluxgate-Magnetometers müssen mit Hilfe der im entsprechenden Abschnitt aufgeführten Konstante in die magnetische Flussdichte um-

gerechnet werden.

Schritt 2: Die einzelnen Profile werden nacheinander ausgewertet. Dabei werden die Diagramme, bei denen die jeweilige Messgröße des Instruments (siehe entsprechender Abschnitt in der Theorie oder Tabelle 6) aufgetragen ist über der Profilkoordinate auf Anomalien untersucht. Für eine bessere Vergleichbarkeit wird die Differenz zwischen den Messwerten entlang der einzelnen Profile und dem Messwert an der Basisstation betrachtet. Auftretende Maxima und Minima lassen Rückschlüsse auf den Verlauf, die Breite und eventuell auch die Neigung zu. Aus der Kurve der Messergebnisse kann auch auf die Lage des Körpers im Raum geschlossen werden.

Schritt 3: Die durchgeführte Kartierung wird graphisch ausgewertet. Dieser Teil besteht vor allem aus einer Diskussion in der Interpretation, da die Auswertung der Kartierung von den Betreuern der Übung vorgenommen wurde und in diesem Protokoll so nur das Ergebnis aufgeführt ist. Es werden Modelle einfacher Körper herangezogen um die Messwerte zu erklären. Es kann ein Matlabskript benutzt werden um die gemessenen Totalintensitäten durch ein Modell der Anomalie als unendlicher Gang zu erklären. Das Problem, das bei der Auswertung auftritt ist, dass die gemessenen Werte durch eine Vielzahl an Modellen erklärt werden können. Sowohl Form, Breite b in m, Tiefe der Gangoberkante d in m, Tiefe der Gangunterkante D in m, Streichen β in Grad, Neigung ξ in Grad und auch die magnetische Suszeptibilität κ sind nicht bekannt. Die Streichrichtung wird bezüglich magnetisch Nord angegeben und kann in mathematisch positiver und negativer Richtung abgetragen werden. Bei der Angabe des Neigungswinkels wird dieser entgegen dem Uhrzeigersinn bezüglich der Horizontalen abgetragen. Annahmen, die in diesem Matlabskript getroffen werden sind zum einen, dass die Ausdehnung des Störkörpers in horizontaler Richtung unendlich und die vertikale Ausdehnung endlich ist und dass die Topographie nicht berücksichtigt wird. Ziel ist es anhand der Variation der oben genannten Unbekannten eine bestmögliche Angleichung der Referenzkurve an die Messwerte zu erreichen. Dabei muss der Nutzer selber auf die Plausibilität der eingegebenen Parameter achten. [5]

3 Versuchsaufbau und -durchführung

Vor der eigentlichen Messung ist zu beachten, dass alle magnetisierbaren Objekte, die die Messung stören könnten, abgelegt werden müssen.

Zunächst muss eine Referenzstation zur Bestimmung der Änderung des Erdmagnetfeldes im Laufe der Messung installiert werden. Bei diesem Versuch wurde als Basisstation ein Torsions-Magetometer des GFZ verwendet. Wichtig ist, dass die Basisstation weit genug von der Anomalie entfernt aufgebaut wird. Da die Messung an der Basisstation über einen längeren Zeitraum andauert, muss das Magnetometer vor Wettereinflüssen wie direkter Sonneneinstrahlung und Regen, geschützt werden. Das Messgerät muss vor der Messung mit Hilfe einer Dosenlibelle horizontiert und nach Norden ausgerichtet werden. Danach wird die Basisstation mit einem Helmholtzspulenpaar kalibriert. Dabei wird ein Strom zwischen -10mA und 10mA an den Spulen angelegt und das resultierende Magnetfeld in Skalenteilen am Gerät abgelesen. Bei der Ablesung ist darauf zu achten, dass der tote Gang eingestellt wird und sich der Ablesestrich immer von der selben Seite in das Ablesefenster hineinbewegt. Die Spulenkonstante des Geräts beträgt $c = 26.5 \frac{nT}{mA}$. Um die gemessenen Werte hinterher vergleichbar zu machen, werden mit allen anderen verwendeten Magnetometern an der Basisstation Werte gemessen. Einzige Ausnahme bildet das Gradiometer, da das Gradiometer nur den vertikalen Gradienten angibt. Zur Messung wurde ein Fluxgate-Magnetometer der Firma Jalander genutzt, das Gradiometer ist vom Typ Grad601 von Bartington Instruments mit $\Delta z = 1 \text{ m}$. Bei der Messung wurde ein zeitlicher Abstand der Messung von 1 s gewählt, was bedeutet, dass für einen gewünschten räumlichen Abstand der Messpunkte von 1 m die Laufgeschwindigkeit der messenden Person von $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ betragen muss.

Mit Hilfe des Gradiometers wird eine grobe Sondierung des Messgebietes vorgenommen um den bestmöglichen Verlauf für die Profile zu finden. Die genauen Verläufe der Profile können der Lageskizzen im Anhang 15 entnommen werden. Profil B zwischen den Punkten B1 und B2 ist 30 m lang und die Abstände der Messpunkte werden wie in Tabelle 3 gewählt. Profil C zwischen C1 und C2 ist 27 m lang und die Abstände der Messpunkte können Tabelle 4 entnommen werden. Profil D zwischen D1 und D2 ist 32 m lang und die Abstände der Messpunkte können Tabelle 5 entnommen werden. Profil C wurde in einem Zeitraum zwischen 12:30 Uhr und 12:50 Uhr MSZ mit dem Protonen-Präzessions-Magnetometer vermessen. Profil B wurde mit dem Fluxgate-Magnetometer ab 12:40 bis 13:15 Uhr MSZ, ab 12:10 Uhr MSZ mit dem Protonen-Präzessions-Magnetometer und um 12:55 Uhr MSZ mit dem Gradiometer vermessen. Profil D wurde um 12:50 Uhr MSZ

Tabelle 3: Abstände der Messpunkte bei Profil B

Profilkoordinate in m	Abstand in m
0-12	1
12-19	0.5
19-39	1

Tabelle 4: Abstände der Messpunkte bei Profil C

Profilkoordinate in m	Abstand in m
0-8	1
8-16	0.5
16-27	1

Tabelle 5: Abstände der Messpunkte bei Profil D

Profilkoordinate in m	Abstand in m
0-11	1
11-32	0.5

mit dem Gradiometer und ab 12:54 bis um 13:15 Uhr MSZ mit dem Protonen-Präzessions-Magnetometer vermessen. Es werden jeweils zwei Messwerte pro Messpunkt aufgezeichnet. Eine Ausnahme bildet dabei das Gradiometer.

Der Abstand der Messpunkte ist so gewählt, dass über der vermuteten Anomalie der Abstand der Messpunkte 0.5 m beträgt und ansonsten 1 m. Beim Gradiometer wird eine Messung pro Sekunde vorgenommen.

Zum Schluss wird mit dem Gradiometer auf einem Gebiet von 10 m auf 10 m eine Kartierung vorgenommen. Die genaue Lage des Gebiets zwischen den Punkten K1 und K4 kann ebenfalls der Lageskizze im Anhang entnommen werden.

Mit dem Gradiometer wird ein Gebiet von 10 m x 10 m kartiert. Dafür muss zunächst das höhere Gras niedergetreten werden, damit leichteres Durchkommen garantiert und eine gleichmäßige Messung erreicht werden kann. Dann wird in südlicher Richtung in einem Abstand von 0.5 m eine Bahn vermessen mit Abständen der Messpunkte in westlicher Richtung von 1 m.

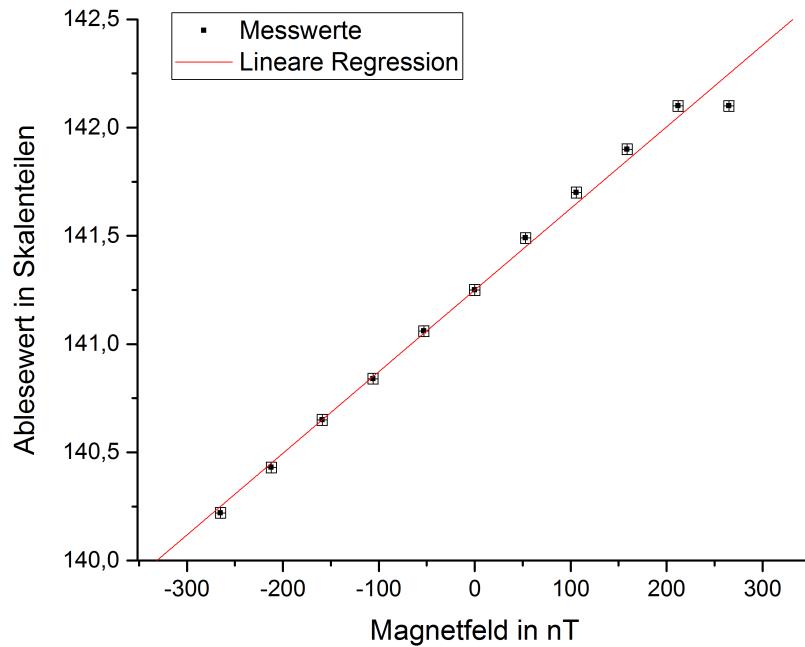


Abbildung 2: Kalibrierungskurve der Basisstation (1. Messung)

4 Auswertung

Es wird analog zu der in der Theorie im Kapitel 'Auswertungsschritte' vorgestellten Vorgehensweise vorgegangen. Bei der Auswertung wird mit der Software OriginPro 2016G und Microsoft Excel 2016 gearbeitet.

4.1 Bestimmung des Kalibrierungsfaktors und des Tagesgangs

Zunächst wird der Kalibrierungsfaktor für das Torsions-Magnetometer, wie in der Theorie beschrieben ermittelt. Die Steigung m der Ausgleichsgerade durch Abbildung 2 beträgt $m_1 = 0.00377 \pm 1.09 \cdot 10^{-4} \frac{\text{nT}}{\text{Skt}}$. Damit ergibt sich der Kalibrierungsfaktor zu

$$R_1 = \frac{1}{m_1} = 265.25 \pm 7.67 \frac{\text{nT}}{\text{Skt}} \quad (14)$$

In einer zweiten Messung zur Bestimmung des Kalibrierungsfaktors, die in Abbildung 3 dargestellt ist, ergibt sich die Steigung der Ausgleichsgerade $m_2 = 0.0039 \pm 5.69205 \cdot 10^{-5} \frac{\text{nT}}{\text{Skt}}$. Daraus resultiert folgender Kalibrierungsfaktor

$$R_2 = R = \frac{1}{m_2} = 256.41 \pm 3.74 \frac{\text{nT}}{\text{Skt}}. \quad (15)$$

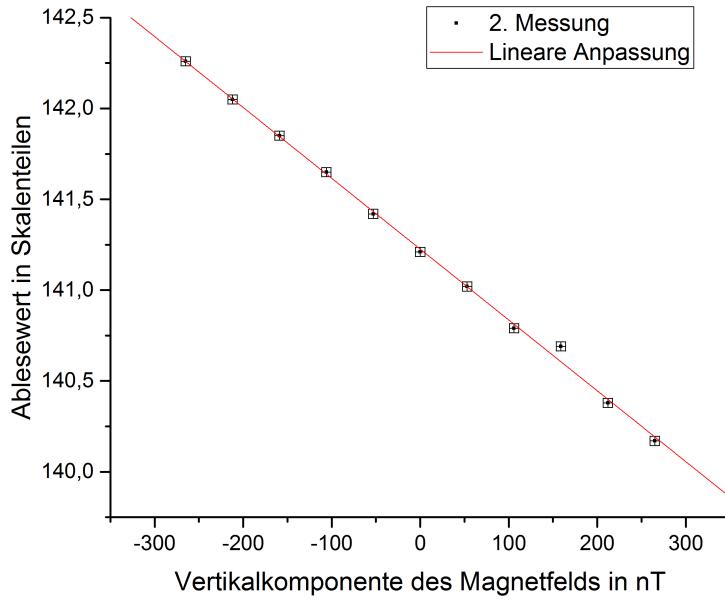


Abbildung 3: Kalibrierungskurve der Basisstation (2. Messung)

Der Grund warum beide Messungen ein unterschiedliches Vorzeichen der Steigung besitzen, liegt daran, dass an bei der 2. Messung die Polarisation des Stroms vertauscht ist. Aus Gründen, die in der Fehlerbetrachtung näher erläutert werden, wird der Wert der 2. Messung R als Kalibrierungsfaktor verwendet.

Mit Hilfe des gerade bestimmten Kalibrierungsfaktors R können nun die gemessenen Werte an der Basisstation von der Einheit Skt in die magnetischen Feldstärke B umgerechnet werden. Damit ergibt sich Abbildung 4. Die Messwerte des Fluxgate-Magnetometers, das einzigen Magnetometer, das die Vertikalkomponente B_z misst, müssen nicht mit dem Tagesgang korrigiert werden. Näheres dazu findet sich in der Interpretation.

In Tabelle 6 sind die Messwerte der Messgeräte an der Basisstation zu finden. In Tabelle 9 im Anhang können die Messwerte des Torsions-Magnetometers gefunden werden.

4.2 Auswertung von Profil B

In Abbildung 5 ist das Ergebnis der Messung mit dem Protonen-Präzessions-Magnetometer entlang von Profil B zu sehen. Die genauen Messwerte können Tabelle 12 entnommen werden. Im Vergleich zur Messung an der Basisstation ist die Totalintensität fast entlang des gesamten Profils geringer. Trotzdem ist ein

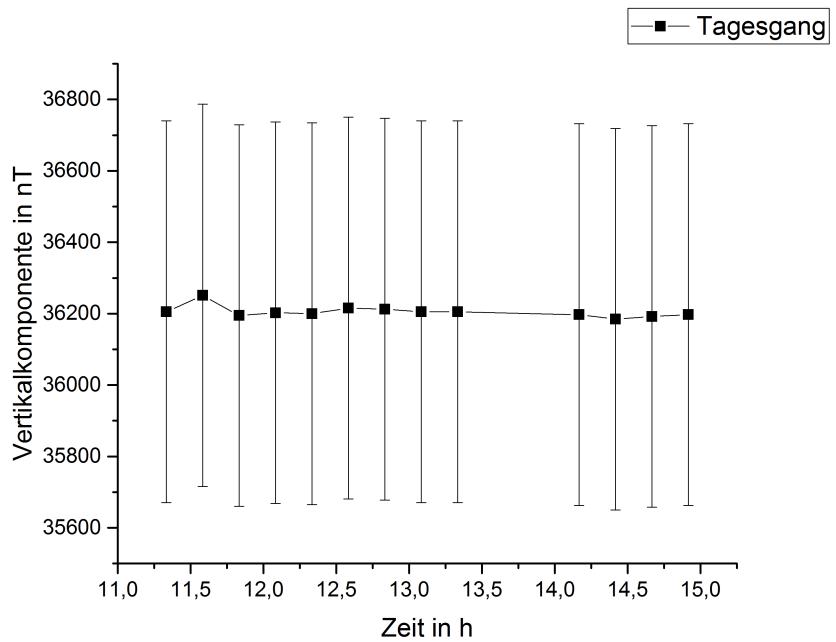


Abbildung 4: Die an der Basisstation gemessene Variation des Magnetfelds während der Messung

Tabelle 6: Gemessene Magnetfelder des Protonen-Präzessions-Magnetometers und des Fluxgate-Magnetometers an der Basisstation

Messgerät	Abgelesener Wert in nT	gemessene Komponente
Protonen-Präzessions-Magnetometer	47927 ± 1	Totalintensität
Fluxgate-Magnetometer	2106 ± 41	Vertikalkomponente

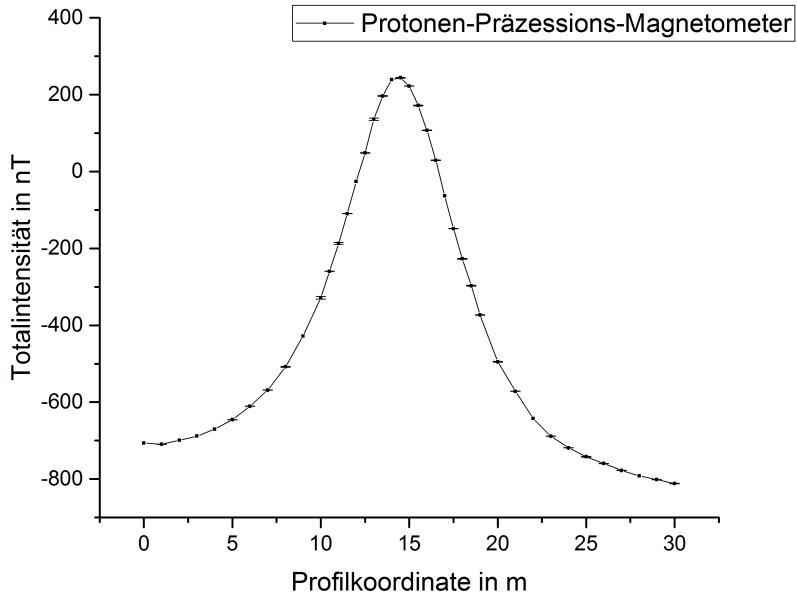


Abbildung 5: Änderung der Totalintensität entlang von Profil B bezogen auf die Referenzmessung an der Basisstation gemessen mit dem Protonen-Präzessions-Magnetometer (siehe Tabelle 6)

deutlicher Anstieg der Totalintensität zu verzeichnen. Zwischen etwa 12 m und 17 m ist die Totalintensität sogar höher als am Basispunkt. Das Maximum befindet sich bei etwa 15 m. Am östlichen Ende des Profils ist die Totalintensität im Vergleich zur Basisstation niedriger als am westlichen Ende.

Abbildung 6 zeigt die Änderung der vertikalen Komponente entlang des Profils B im Bezug auf die vorher getätigte Referenzmessung am Basispunkt gemessen mit dem Fluxgate-Magnetometer. Die genauen Messwerte können in Tabelle 10 gefunden werden. Am westlichen und am östlichen Ende stimmt die vertikale Komponente etwa mit der vertikalen Komponente am Basispunkt überein. Es zeichnet sich auch hier ein deutliches Maximum bei etwa 15 m ab mit etwa 1500 nT mehr als am Basispunkt. Interessant sind 3 Punkte, die deutliche Differenzen zu der ansonsten glatten Kurve aufweisen. Diese Punkte liegen bei etwa 15.5 m, 18 m und 29 m.

Auch das Messergebnis des Gradiometers in Abbildung 7 hat einen ähnlichen Verlauf wie die beiden gerade beschriebenen Messkurven der anderen Messinstrumente. Hier jedoch liegt das Maximum bei etwa 13 m und verläuft deutlich spitzer als bei den anderen beiden Messinstrumenten. Am westlichen und am östlichen Ende gibt es so gut wie keine Auffälligkeiten im Gradienten. Direkt vor dem starken Anstieg zum Maximum bei etwa 9 m und direkt nach dem starken

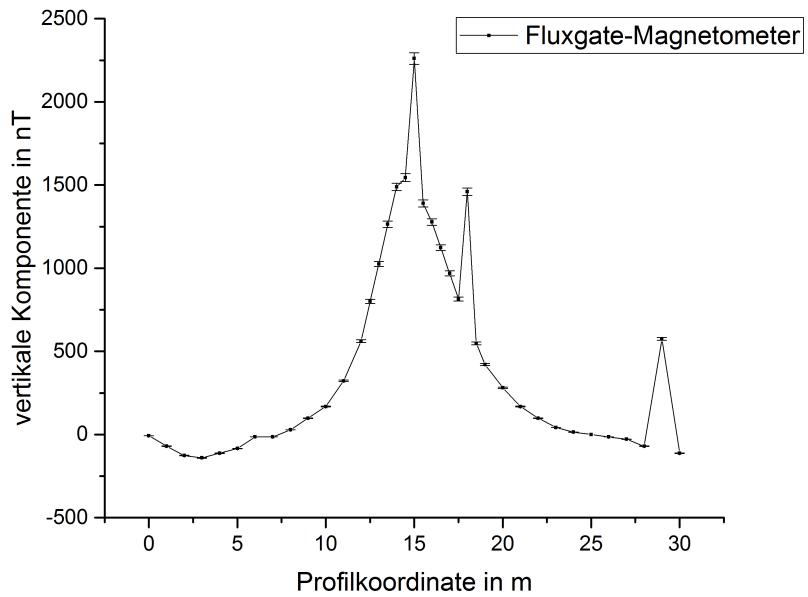


Abbildung 6: Änderung der vertikalen Komponente entlang von Profil B bezogen auf die Messung an der Basisstation, gemessen mit dem Fluxgate-Magnetometer (siehe Tabelle 6)

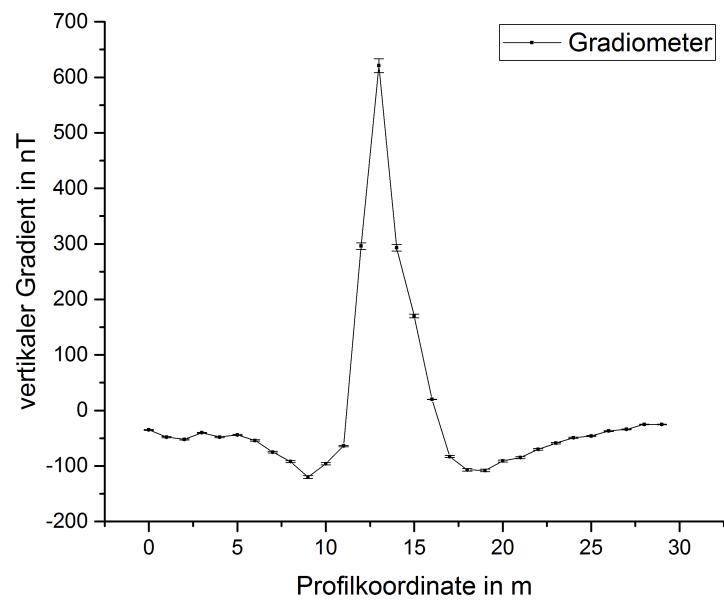


Abbildung 7: Änderung des vertikalen Gradienten entlang von Profil B gemessen mit dem Gradiometer

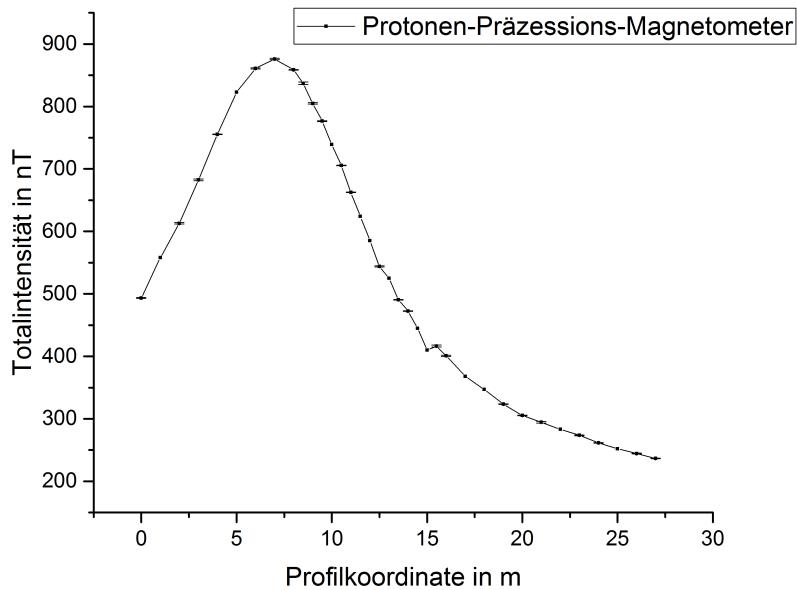


Abbildung 8: Änderung der Totalintensität entlang von Profil C bezogen auf die Referenzmessung an der Basisstation gemessen mit dem Protonen-Präzessions-Magnetometer (siehe Tabelle 6)

Abfall bei etwa 18 m weißt die Kurve Minima auf.

4.3 Auswertung von Profil C

In Abbildung 8 ist das Ergebnis der Messung mit Protonen-Präzessions-Magnetometer entlang des Profils C zu sehen. Die genauen Messwerte können Tabelle 15 entnommen werden. Dargestellt ist die Änderung der Totalintensität in nT bezogen auf den Referenzwert an der Basisstation. Zu sehen ist, dass auch wie bei Profil B ein ausgeprägtes Maximum vorliegt. Dieses Maximum befindet sich bei 7.5 m mit einer Differenz von 870 nT zur Referenzmessung. Auffällig ist, dass das Maximum deutlich weiter am westlichen Ende des Profils zu finden ist, als bei Profil B. Außerdem ist das Maximum der Totalintensität entlang des Profils deutlich höher. Am östlichen Ende des Profils sinkt die Totalintensität auf seinen niedrigsten Wert .

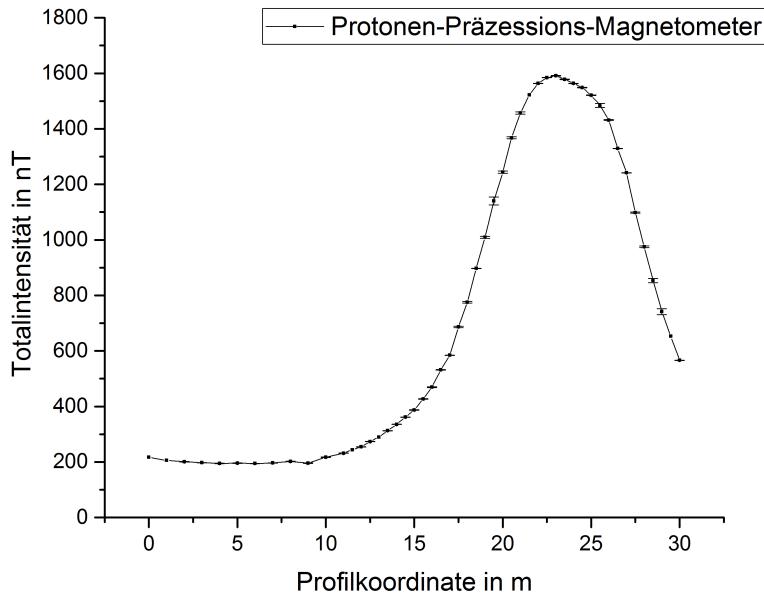


Abbildung 9: Änderung der Totalintensität entlang von Profil D bezogen auf die Referenzmessung an der Basisstation, gemessen mit dem Protonen-Präzessions-Magnetometer (siehe Tabelle 6)

4.4 Auswertung von Profil D

In Abbildung 9 ist die Änderung der Totalintensität in nT bezogen auf die Referenzmessung an der Basisstation zu sehen. Die genauen Werte können Tabelle 17 im Anhang entnommen werden. Gemessen wurde mit einem Protonen-Präzessions-Magnetometer. Es ist auch hier ein deutliches Maximum zu sehen, das sich bei etwa 23 m befindet und etwa 1600 nT stärker ist, als die Referenzmessung. Insgesamt liegt das gesamte Profil in einem Bereich erhöhter Totalintensität. In Abbildung 10 ist das Ergebnis der Messung entlang des Profils D mit dem Gradimeter zu sehen. Die genauen Messwerte können der Tabelle 19 im Anhang entnommen werden. Am westlichen Ende des Profils liegt der vertikale Gradient leicht unterhalb des Gradienten an der Basisstation. Bei etwa 13 m sinkt er auf ein Tief und steigt dann stark an und erreicht bei etwa 22 m ein Maximum mit etwa 580 nT, mehr als bei der Basisstation gemessen wurde. Danach sinkt der Wert des vertikalen Gradienten stark auf 200 nT bei etwa 23 m um direkt danach wieder auf das globale Maximum von 650 nT bei 26 m zu steigen. Danach sinkt der Wert wieder sehr stark. Besonders interessant ist hier, dass es zwei deutlich voneinander getrennte Maxima gibt, die bei dem Protonen-Präzessions-Magnetometer in Abbildung 9 nicht zu sehen sind.

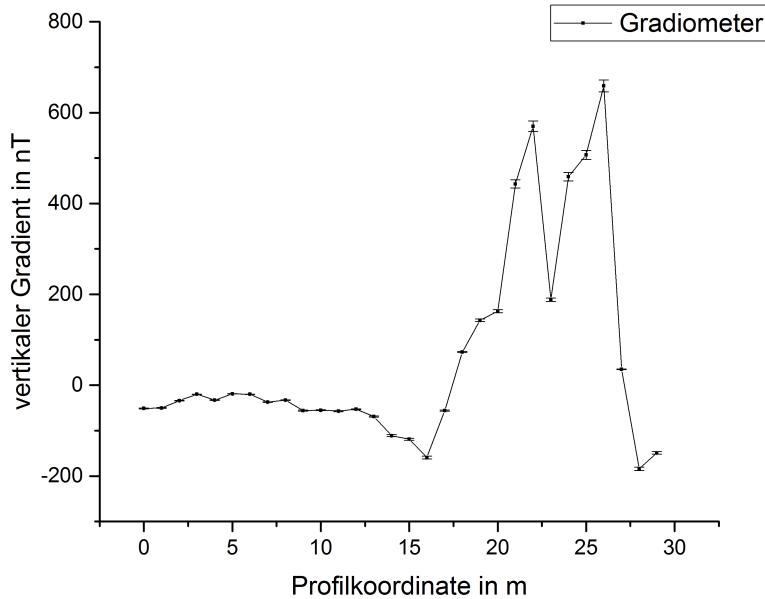


Abbildung 10: Änderung des vertikalen Gradienten entlang von Profil D gemessen mit dem Gradiometer

4.5 Auswertung der Kartierung

Die Kartierung, die wie in der Versuchsdurchführung beschrieben, durchgeführt wurde, liefert folgendes Ergebnis in Abbildung 11. Dabei sind auf den Achsen die Profilkordinaten in m aufgetragen und mit Hilfe einer Farbskala, die den Gradienten der Vertikalkomponente in $\frac{nT}{m}$ darstellt, ist das Ergebnis farblich kodiert. Dabei kennzeichnet rot Stellen mit erhöhtem Gradienten und blau Stellen mit erniedrigtem Gradienten. Deutlich ist ein Übergang von der hauptsächlich hellblauen Umgebung in ein rotes und dann dunkelrotes Band durch die Fläche zu erkennen. Dabei ist innerhalb des Bereichs des erhöhten Gradienten ein schmäler Bereich mit maximalem vertikalen Gradienten von über $600 \frac{nT}{m}$, das sich von Norden bei der Profilkordinate 4.5 m in Ostrichtung bis in den Süden zieht. Interessant an dem Verlauf des Bereichs des erhöhten vertikalen Gradienten ist, dass der Bereich etwa bei 5 m in Südrichtung einen "Knick" macht bzw. eine enge Kurve beschreibt. Auch der Bereich des maximalen vertikalen Gradienten folgt dieser Bewegung.

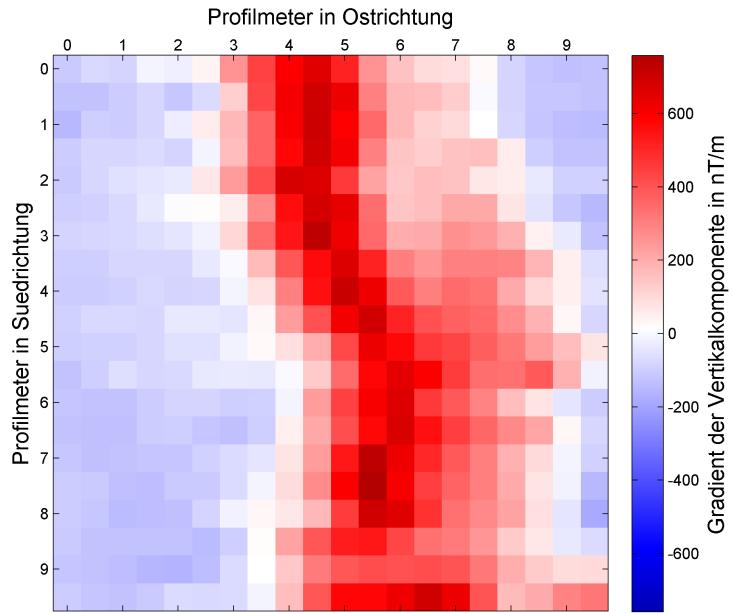


Abbildung 11: Ergebnis der Kartierung einer $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ großen Fläche über dem Basaltgang

Tabelle 7: Werte der Modellierung in Matlab

Profil	D in m	β in Grad	x_i in Grad	κ	d in m	b in m	XPOS in m
B	59	5	88	0.007	2.1	6.5	11.8
C	59	5	88	0.007	5.1	7	4

4.6 Modellierung mit Matlab

Wie bereits in der Theorie beschrieben, kann das Matlab Skript *magnetik_gang.m* zur Modellierung der Anomalie verwendet werden. Dabei kann das Skript angewendet werden für die Kurven, die die Totalintensität darstellen. Es werden die Werte des Protonen-Präzessions-Magnetometers entlang des Profils B sowie die Werte des selben Messinstruments entlang Profils C modelliert. Dabei werden die in Tabelle 7 aufgeführten Annahmen verwendet. Dabei ist D die Tiefe der Unterkante des Ganges in m, β das Streichen bzgl. magnetisch Nord in Grad, x_i die Neigung entgegen dem Uhrzeigersinn in Grad, κ die magnetische Suszeptibilität, d die Tiefe der Oberkante des Ganges in m, b die Breite des Basaltgangs in m und XPOS gibt den Ursprung des Koordinatensystems in m der Modellierung an.

Weiterhin wurde bei beiden Modellen die Inklination $I_H = 63.75^\circ$, die Totalintensität des Hintergrundfeldes $T_H = 47927\text{ nT}$ und DATASHIFT = 48200 angenom-

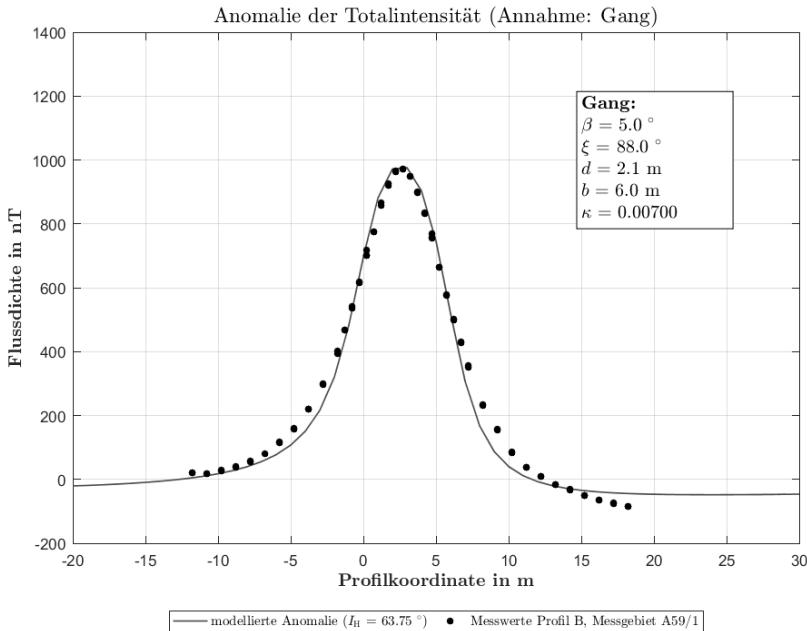


Abbildung 12: Modell zur Positionierung eines Ganges um die Messwerte entlang des Profils B zu erklären

men. Der angenommene Wert für κ wurde innerhalb des im Buch Grundlagen der Geophysik von Hans Berckhemer angegebenen Intervall von $1500 \cdot 10^{-6}$ bis $90000 \cdot 10^{-6}$ variiert.

Abbildung 12 zeigt ein mögliches Modell zur Erklärung der gemessenen Änderung der Totalintensität entlang von Profil B mit den Annahmen aus Tabelle 7. Es ist erkennbar, dass die durchgezogene Kurve, die an die Messwerte, hier gepunktet dargestellt, angepasst wird, gut mit den Messwerten übereinstimmt. Der Verlauf der Messkurve wurde in Zusammenhang mit Abbildung 5 bereits behandelt, deshalb soll hier nur auf die Anpassung an die Messkurve eingegangen werden. Leichte Abweichungen zeigen sich bei der Profilkordinate -7 m bis -2 m und bei der Profilkordinate 7 m bis 12 m. Außerdem sinkt die Messkurve am Ende leicht unter die modellierte Kurve.

In Abbildung 13 wird ein Modell erstellt zur Erklärung der auftretenden Anomalie entlang des Profils C. Dabei wurde bei den Annahmen darauf geachtet eine große Ähnlichkeit zu dem Modell für Profil B beizubehalten. Den genauen Zusammenhang zwischen beiden Modellen kann Tabelle 7 entnommen werden. Zu erkennen ist in Abbildung 13, dass die Modellierung sehr gut passt und es lediglich bei den Profilkordinaten 12 m bis 15 m zu einer Abweichung von der Messkurve kommt. Der Verlauf der Messkurve wurde im Zusammenhang mit Abbildung 8 bereits besprochen und soll deshalb an dieser Stelle nicht erneut auf-

Tabelle 8: Werte der Modellierung in Matlab

Profil	D in m	β in Grad	x_i in Grad	κ	d in m	b in m	XPOS in m
C	60	-7	99	0.0073	-4.5	-5	10.9

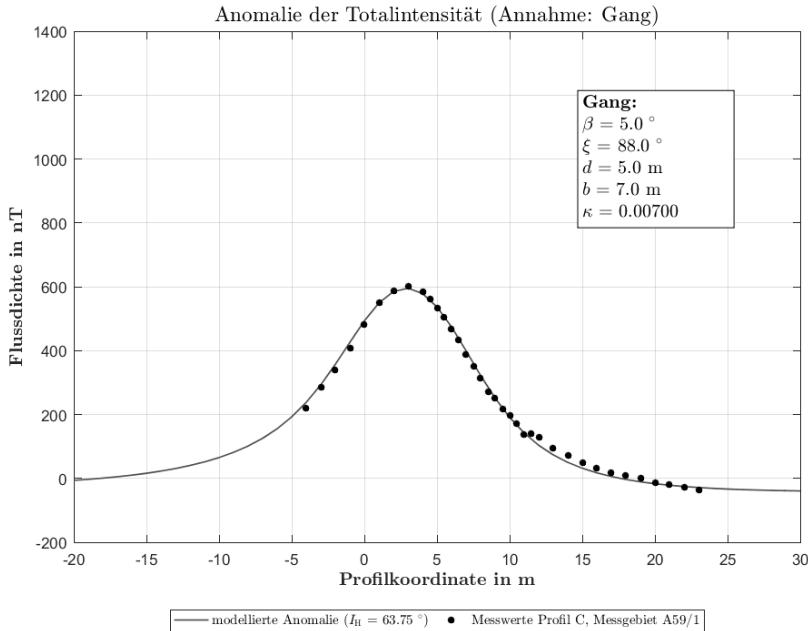


Abbildung 13: Modell zur Erklärung der Anomalie entlang des Profils C

geführt werden. Ein großer Unterschied zwischen den beiden Modellen ist zum einen die Tiefe, in der der Gang angenommen wird und zum anderen die Position des Koordinatenursprungs der Modellierung. Die Breite des Ganges wurde nur leicht unterschiedlich modelliert.

Zusätzlich wird mit dem selben Matlabskript noch ein Modell erstellt, das zwar die Anomalie gut beschreibt, aber nicht realistisch ist. Die Annahmen für dieses Modell finden sich in Tabelle 8. Unrealistisch ist an diesen Annahmen, dass sowohl die Gangbreite als auch die Tiefe der Oberkante des Ganges als negativ angenommen wurde. In Abbildung 14 ist die selbe Messkurve zu sehen wie in Abbildung 13 mit jedoch anderen Modellannahmen. Zu sehen ist dass das Modell in Abbildung 14 die Messkurve zwar nicht ganz so gut beschreibt wie in Abbildung 13, aber trotzdem noch zufriedenstellend. Lediglich ganz zu Beginn der Messkurve bei Profilkordinate 10 m und am Ende ab Profilkordinate 7 m weicht das Modell von der Messkurve ab.

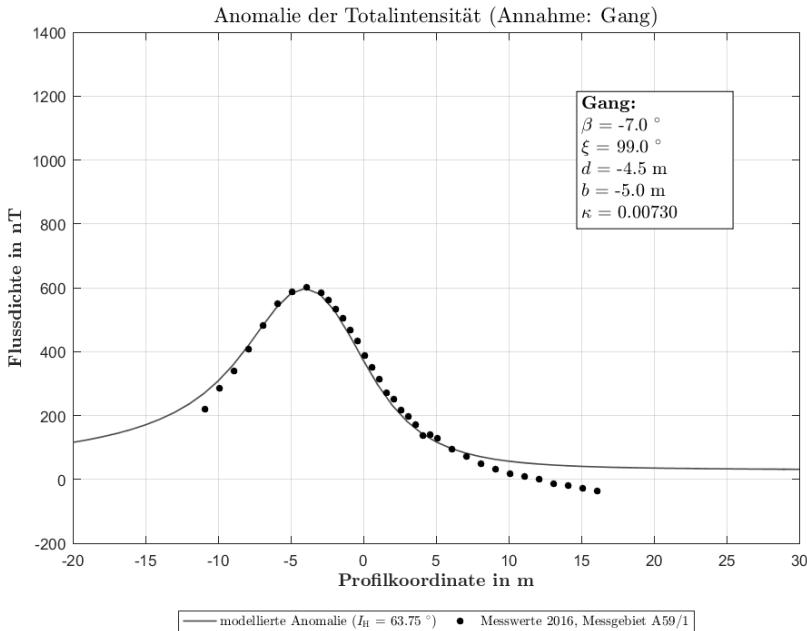


Abbildung 14: Modell zur Erklärung der Anomalie entlang des Profils C mit unrealistischen Annahmen

5 Interpretation

Zu Beginn wird eine kurze mögliche Erklärung warum der Basaltgang als Störkörper wird angelegt an die Ausführungen über das Erdmagnetfeld in der Theorie. Bei der Entstehung des Basaltgangs der bei der Durchführung der Magnetikmessung dieses Protokolls untersucht wurde, hat sich die damals flüssige und nicht magnetisierte Lava beim Abkühlen eine zur damaligen Erdmagnetfeldrichtung parallele Magnetisierung ausgebildet. Die gerade erwähnte Umpolung des Magnetfeldes ist ein Grund warum die Richtung der Magnetisierung des Basaltgangs nicht mehr mit der Richtung des heutigen Magnetfelds übereinstimmt und der Gang deshalb als Störkörper wirkt. Ein weiterer Grund ist möglicherweise, dass sich der Basaltgang seit seiner Entstehung durch Bewegung im Untergrund verschoben oder verkippt hat. Die Magnetisierung des Basaltgangs kommt wahrscheinlich von magnetischen Mineralen wie Magnetit, die ferrimagnetische Eigenschaften besitzen[1, 2]. Allerdings wird, wie in der Theorie bereits erläutert, bei der Messung nur davon ausgegangen, dass der Basaltgang nur induzierte Magnetisierung besitzt.

Im folgenden sollen die Ergebnisse aus der Auswertung in einem geophysikalischen Kontext im Bezug auf die in der Einleitung formulierte Fragestellung

interpretiert werden.

Zuvor noch ein Wort zu den Korrekturen der Messwerte der einzelnen Magnetometer mit dem Tagesgang. Es zeigt sich, dass es nicht sinnvoll ist die Messwerte des Fluxgate-Magnetometers zu korrigieren, da die Änderungen der Messwerte durch den Tagesgang noch innerhalb der Fehlertoleranz der Messwerte liegt. Insgesamt liegt der Tagesgang in der erwarteten Größenordnung (abgesehen von dem Ausreißer bei circa 11:30 Uhr). Im Vergleich zu den gemessenen Werten für die Anomalie ist die Schwankung des Magnetfelds im Verlauf der Messung ohnehin vernachlässigbar klein.

Nun soll auf die Auswertung der einzelnen Profile eingegangen werden. Profil B wurde mit allen drei Messgeräten vermessen. Die drei Abbildung 6, 7 und 5 die daraus resultieren sind von ihrer Aussage sehr ähnlich. Alle drei verzeichnen ein Maximum der jeweiligen Größe, die sie erfassen an ungefähr der selben Profilkordinate. Dabei liegt das Maximum des Gradiometers wenige Meter vor dem Maximum des Fluxgate- und des Protonen-Präzessions-Magnetometers. Insgesamt verzeichnen alle drei Messinstrumente einen starken Anstieg der jeweiligen Messgröße, was dafür spricht, dass sich der Basaltgang relativ flach unterhalb der Erdoberfläche befindet. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen, die beispielweise die Seismik ergeben hat. In der Seismik kam eine Tiefe der Oberkante des Ganges von etwa 0.56 m bis 0.86 m heraus. Die in Abbildung 6 auffälligen Ausreißer sind vermutlich keine kleinräumigen Anomalien, sondern eher Messfehler. Darauf jedoch wird in der Fehlerbetrachtung näher eingegangen. Dass in Abbildung 7 das Maximum sehr spitz verläuft, liegt möglicherweise daran, dass der Messabstand beim Gradiometer 1 m war und nicht wie bei den anderen Messungen, bei denen über der Anomalie ein Messabstand von 0.5 m eingehalten wurde. Dadurch ergeben sich weniger Messpunkte und der genaue Verlauf des vertikalen Gradienten kann nicht bis ins Detail nachvollzogen werden.

Von Profil C liegt nur der Messwert des Protonen-Präzessions-Magnetometers vor. Im Vergleich zu Profil B liegt das Maximum der Änderung der Totalintensität weiter im Westen bei circa 7.5 m.

Von Profil D liegt eine Messung des Protonen-Präzessions-Magnetometers und des Gradiometers vor. Das Protonen-Präzessions-Magnetometer liefert in Abbildung 9 ein Maximum bei 24 m. Die Änderung der Totalintensität ist im Vergleich zum Profil B und Profil C deutlich größer. Dies legt nahe, dass der Basaltgang beim Profil D näher an der Oberfläche liegt. Dies passt allerdings nicht zu den Ergebnissen der Seismik (nachzulesen im Protokoll Seismik von Alicia Rohnacher und Ann-Kathrin Edrich). Dabei wurde das Profil A vermessen, das sich am ver-

muteten Verlauf des Basaltgangs orientiert. Es wurde eine geneigte Oberkante des Basaltgangs ermittelt. Allerdings lag der Basaltgang beim Schnittpunkt von Profil A und D tiefer unterhalb der Erdoberfläche als am Endpunkt von Profil A, der am nächsten am Profil B liegt. Die Messung mit dem Gradiometer zeichnet sich besonders durch die auffällige Doppelspitze aus. Es scheint wahrscheinlich, dass an diesem Punkt ein Messfehler unterlaufen ist, weil die Messung mit dem Protonen-Präzessions-Magnetometer keine Auffälligkeiten in dieser Hinsicht gezeigt hat. Auch in den anderen Versuchen, bei denen Profil D vermessen wurde hat sich in dieser Hinsicht keine Auffälligkeit gezeigt.

Die deutliche Erhöhung der Messwerte entlang des Profils C und D gegenüber der Basisstation und die deutlichen Erniedrigung der Totalintensität im Verhältnis zur Basisstation entlang des Profils B ist nicht direkt verständlich. Es scheint im Untergrund eine kleinräumige Änderung der Gesteine zu geben. Der Ursprung könnte in teilweise verwitterten und zerkleinerten Bruchstücken des Basaltgangs liegen, die großräumig im Untergrund verteilt sind, liegen. Eventuell sind es auch andere Materialien vulkanischen Ursprungs. In den Bereichen erniedrigter Totalintensität könnte beispielsweise verstärkt diamagnetische Minerale vorhanden sein [8]. Bei einer Grabung in einem halben Meter Tiefe, konnten Gesteinsbruchstücke gewonnen werden. Mit Hilfe des Archimedischen Prinzips wurde die Dichte eines solchen Gesteinsbrockens ermittelt und nach dem Ergebnis von $\rho = 2960 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ kann der Gesteinsbrocken tatsächlich als Basalt eingeordnet werden. In der Literatur wird die Dichte von Basalt mit $\rho_{\text{Lit}} = 2700 - 3100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ angegeben [?]. Insgesamt wird durch die Position des Maximums in den Abbildungen der einzelnen Profile deutlich, dass der Basaltgang von Nordwest nach Südost verläuft. Dieses Ergebnis stimmt mit dem Ergebnis der Seismik überein. Die Breite der Maxima kann einen Hinweis auf die Breite des Basaltgangs liefern. Jedoch muss beachtet werden, dass eine Übergangszone zwischen Umgebung und Basaltgang gibt und dass die Breite der Anomalie nicht eins zu eins in die Breite des Basaltgangs übertragen werden kann. Eine solche Übergangszone kann beispielsweise durch verwittertes Gestein am Rand des Basaltgangs herrühren.

Die Kartierung einer 10 m x 10 m großen Fläche über dem Basaltgang ergibt Abbildung 11. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Anomalie mit dem erhöhten vertikalen Gradienten der Basaltgang ist. Interessant ist vor allem, was die Kartierung über den Verlauf des Basaltgangs verrät. Die Kartierung zeigt zwar nur einen kleinen Ausschnitt, aber führt dazu, den vorherigen und auch weiteren Verlauf zu hinterfragen. Der leichte Bogen den er vollführt, könnte sich natürlich auch an anderen Stellen wiederholen, die nicht mit einer Kartierung betrachtet

werden. Es ist nicht möglich zu sagen wie genau der Basaltgang verläuft, aber die Kartierung zeigt eindrucksvoll, dass der Basaltgang kein gerade Körper ist. Bei der Erstellung eines möglichen Modells, das die Werte der Messung entlang der Profile C und B erklärt, ergeben sich folgende Abbildungen 12 und 13. Tatsächlich wurde bei der Erstellung des Modells darauf geachtet die Ergebnisse aus der Seismikmessung mit einzubeziehen. Es wurde konkret darauf geachtet, dass der Basaltgang so nahe an der Erdoberfläche liegt wie es sinnvolle Einstellungen der anderen Parameter erlaubt. Tatsächlich spiegeln sich auch Ergebnisse der Seismik in der Modellierung wieder. Zum einen die bereits in der Auswertung beschriebene Verschiebung des Koordinatenursprungs des Modells, was in der Realität einem Schnittpunkt des Basaltgangs mit dem Profil entspricht, der sich nicht mehr an der selben Profilkordinate befindet wie bei den anderen Profilen. Dies weist auf einen schrägen Verlauf hin. Dieses Verhalten wurde auch oben bereits angesprochen bei der Interpretation der Messkurven der einzelnen Profile. Weiterhin scheint der Basaltgang bei Profil C, das sich weiter im Norden befindet als Profil B, tiefer zu liegen. Das kann aus der stärkeren Änderung der Totalintensität bei Profil B als bei Profil C geschlossen werden. Dieses Verhalten konnte wie bereits oben beschrieben nicht mit der Seismik festgestellt werden. Interessant ist wie gut das Modell mit den unrealistischen Werten aus Tabelle 8, zu sehen in Abbildung 14, die Messkurve beschreibt. Zwar würden die angenommenen Werte einen aus dem Untergrund herausragenden Basaltgang bedeuten, was nach den Beobachtungen im Messgebiet nicht der Fall ist und es natürlich auch keine negative Gangbreite gibt, aber diese Widersprüche spiegeln sich nicht in der angepassten Kurve wieder. Das zeigt zum einen die Mehrdeutigkeit der Magnetik und auch, dass solche Modellierungen mit Vorsicht zu betrachten sind. Bei der Erstellung eines solchen Modells muss penibel auf die Plausibilität geachtet werden.

Zum Schluss sollen noch ein paar Bemerkungen zu den Messgeräten gemacht werden. Durch die Verwendung verschiedener Messinstrumente und der Analyse der Ergebnisse zeigen sich die Vor- und Nachteile der verschiedenen Geräte. Das Fluxgate-Magnetometer ist sehr ungenau mit einem großen Fehler. Außerdem ist es schwer das Gerät wirklich senkrecht zu halten um nur die Vertikalkomponente zu erfassen. Zwar ist an dem Gerät eine Dosenlibelle angebracht, aber durch das Drücken des etwas schwerfälligen Knopfes zur Messung, kann die Position nur schwer gehalten werden. Außerdem ist es bei Wiederholungsmessung schwer noch einmal genau die selbe Profilkordinate zu vermessen. Ein Vorteil ist die Handlichkeit des Geräts. Es ist möglich es einfach um den Hals zu hängen. Das

Gradiometer eignet sich besonders für oberflächennahe Strukturen. Bei der Messung ist aber wichtig die Schrittgeschwindigkeit an das Messintervall anzupassen und so ist es nicht immer einfach in regelmäßigen Abständen einen Messpunkt zu erfassen. Das Protonen-Präzessions-Magnetometer zeichnet sich durch die hohe Genauigkeit aus, ist allerdings ziemlich groß und schwer. Als abschließendes Fazit kann gesagt werden, dass die Anomalie mit allen drei Geräten deutlich erfasst werden konnte.

6 Fehlerbetrachtung

An verschiedenen Stellen während des Versuchs und der Auswertung sind Fehler und Unsicherheiten aufgetreten. Im folgenden soll nun eine wenn möglich quantitative Fehlerabschätzung und wenn dies nicht möglich ist eine qualitative Beschreibung der Fehler erfolgen.

Vor Beginn der Messung müssen alle beteiligten Personen magnetisierbare Objekte ablegen, da diese ebenfalls in die Messung eingehen. Außerdem muss darauf geachtet werden, dass auch die Autos weit genug von dem Messgebiet entfernt geparkt werden. Es gibt jedoch Störkörper, die nicht abgelegt werden können, wie beispielsweise Reißverschlüsse von Kleidern. Außerdem kann es passieren, dass am Messgebiet Autos vorbeifahren, die einen Einfluss auf die Messung haben können. Beispielweise ist bei der Vermessung von Profil D, dessen Ergebnis in Abbildung 9 gefunden werden kann, bei der Messung bei Profilkordinate 19.5 m ein Auto vorbeigefahren. Es ist erkennbar, dass es keine sichtbare Anomalie auf Grund des Autos gibt. Das könnte zum einen daran liegen, dass die Profilkordinate 19.5 m weit von der Straße entfernt liegt und zum anderen könnte es ein Hinweis sein, dass die Störeinflüsse eines solchen Objekts nicht sehr groß sind.

Bei der Bestimmung des Kalibrierungsfaktors wurden, wie im Abschnitt 'Auswertung' bereits erwähnt, zwei Messung vorgenommen. Bei Messung 1 ist bei der Bedienung des Torsions-Magnetometers dahingehend ein Fehler aufgetreten, dass die Handhabung des toten Ganges nicht korrekt war und nicht darauf geachtet wurde, dass der Ablesestrich immer von der selben Seite in das Sichtfenster zurückkehrt. Aus diesem Grund wurde eine weitere Messung vorgenommen. Interessant ist nun, dass die Abweichung der anhand beider Messungen bestimmten Kalibrierungsfaktoren betrachtet wird, ergibt sich lediglich eine Abweichung von etwa 3.4%. Dies zeigt, dass dies zwar eine Fehlerquelle darstellt, aber jedoch nur eine geringe. Allerdings ist der Fehler auf das R der zweiten Messung etwa um den Faktor 0.5 kleiner, was dafür spricht, dass es der bessere Messwert ist.

In Abbildung 4 ist um etwa 11:30 Uhr ein deutlicher Sprung zu verzeichnen. Dieser kann als fehlerhafte Messung angesehen und ignoriert werden. Grund hierfür ist, dass dieser Messpunkt nicht plausibel erscheint im Vergleich zum Verlauf der restlichen Kurve. Ein Anstieg von ungefähr 46 nT und Abfallen von ungefähr 56 nT des Magnetfeldes innerhalb so kurzer Zeit wirkt unwahrscheinlich, vor allem weil, wie bereits im entsprechenden Abschnitt in der Theorie erläutert, im Schnitt die tägliche Änderung des Magnetfeldes nur 30 nT beträgt. Ansonsten beträgt die Änderung zwischen dem maximalen Wert des Magnetfeldes und des minimalen Werts der Magnetfeldes 30.8 nT. Dies scheint ein realistischer Wert zu

sein.

Weiterhin müssen die Ablesefehler und sonstige Fehler bei der Einzelmessung beachtet werden. Beim Fluxgate-Magnetometer wird der Ablesefehler auf Grund der Skaleneinteilung auf $\Delta\text{Ablesung} = \pm 25 \text{ nT}$ angenommen. Weiterhin spielt es eine Rolle ob das Messgerät, das die Vertikalkomponente erfasst, komplett senkrecht gehalten wird oder ob es eine Abweichung von der Vertikalen gibt. In der Praxis ist es schwer das Fluxgate-Magnetometer wirklich senkrecht zu halten, da zwar eine Dosenlibelle zur Kontrolle angebracht ist, aber beim Drücken des etwas schwerfälligen Knopfes für die Messung es zu Abweichungen von der Vertikalen kommen kann. Dieser Fehler wird auf $\alpha = \pm 10^\circ$ gesetzt. Das ergibt für das resultierende Magnetfeld $B_{\text{Flux},\text{res}} = B_z \cdot \cos(\alpha)$. Damit ist der Fehler $\Delta\text{Neigung} = B_z - B_{\text{Flux},\text{res}}$. Insgesamt ist das Fluxgate-Magnetometer deutlich ungenauer als die anderen Magnetometer. Dies kann auch die Ausreißer in der Abbildung 6 erklären. Das Protonen-Präzessions-Magnetometer hat eine deutlich höhere Genauigkeit und es wird nur ein Fehler auf die Einzelmessung von $\Delta\text{Einzel} = \pm 10 \text{ nT}$ angenommen. Darin enthalten sind Fehler durch Schieffalten des Instruments sowie die Ungenauigkeit des Messgeräts. Aus dem Datasheet [9] des Gradiometers (siehe Anhang) kann entnommen werden, dass der Kalibrierungsfehler $\Delta\text{Kalibrierung} = \pm 2\%$ beträgt.

Das Torsions-Magnetometer kann auf Grund der Skaleneinteilung mit einem Ablesefehler von $\Delta\text{Ablesung} = \pm 0.025 \text{ Skt}$ angegeben werden. Bei den Werten des Magnetfeldes, die bei der Kalibrierung aufgenommen wurden, beläuft sich der Fehler auf $\Delta B = \pm 5.3 \text{ nT}$, der sich ergibt aus dem Fehler auf die angelegte Stromstärke an die Helmholtzspulen von $\Delta I = \pm 0.2 \text{ mA}$. Der Fehler wurde wie folgt berechnet

$$\Delta B = c \cdot \Delta I = 5.3 \text{ nT}. \quad (16)$$

Der Fehler der dadurch entsteht, dass die Messungen entlang der Profile nicht genau über den Profilkordinate stattfinden, kann vernachlässigt werden, da es ein zufälliger Fehler ist, womit sich der Fehler entlang des Profils heraus mittelt. Außerdem liefert der Fehler, der dadurch entsteht, im Zentimeterbereich liegt, während die Messung im Meterbereich stattfindet und die Änderung der Totalintensität im Zentimeterbereich vernachlässigbar klein ist.

Nun werden die Fehler bei der Auswertung betrachtet. Mit Hilfe von Origin wurden die Plots erstellt, die in diesem Protokoll zu finden sind. Bei der Bestimmung des Kalibrierungsfaktors wurde eine Ausgleichsgerade durch die Messwerte gelegt. Obwohl ein Programm Ausgleichsgeraden deutlich besser durch einen Datensatz legen kann als ein Mensch, gibt es trotzdem einen geringen Feh-

ler auf die Geradensteigung. Zu Demonstrationszwecken findet sich im Anhang die Messwerte der zweiten Messung zur Bestimmung des Kalibrierungsfaktors ohne Ausgleichsgerade. Es wurden zwei mögliche Ausgleichsgeraden von Hand eingezeichnet und die dazugehörigen Kalibrierungsfaktoren berechnet. Es wird deutlich, dass eine verhältnismäßig große Differenz von $\Delta R = 13.51 \frac{\text{nT}}{\text{Skf}}$ entsteht, wenn die Ausgleichsgeraden einen geringfügig unterschiedliche Steigung von $\Delta m = 5.06\%$ aufweisen.

Im weiteren Verlauf der Auswertung werden die einzelnen Diagramme betrachtet, die die Messkurven entlang der einzelnen Profile zeigen. Dabei ergeben sich die Fehler auf die Messpunkte aus den oben genannten Fehlern der einzelnen Messgeräte.

Für das Protonen-Präzessionsmagnetometer wurde der Mittelwert aus beiden auf dem selben Punkt gemessenen Werten gebildet. Der Fehler auf den Mittelwert wird berechnet mit

$$\Delta \bar{x} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^N (x_n - \bar{x})^2}{N - 1}}, \quad (17)$$

wobei x_n jeweils der erste oder zweite Messwert darstellt, aus denen der Mittelwert \bar{x} gebildet wird. x_1 und x_2 haben aber auch jeweils einen Fehler von $\Delta \text{Einzel} = \pm 10 \text{ nT}$. Damit muss auf Gleichung (17) noch die Größtfehlerabschätzung angewendet werden, die wie folgt definiert ist. Der Fehler auf eine Funktion $f(x, y)$, wobei x und y die Fehler Δx und Δy besitzen, beträgt

$$\Delta f = \left| \frac{\delta f}{\delta x} \Delta x \right| + \left| \frac{\delta f}{\delta y} \Delta y \right|. \quad (18)$$

Übertragen auf den Fehler des Mittelwerts ergibt sich

$$\Delta(\Delta \bar{x}) = \pm \frac{1}{\sqrt{N}} \left(\frac{\Delta \text{Einzel}_1}{\sqrt{(x_1 - \bar{x})^2}} + \frac{\Delta \text{Einzel}_2}{\sqrt{(x_2 - \bar{x})^2}} \right) \quad (19)$$

mit $N = 2$ [7]. Wichtig ist, dass Gleichung (19) nur anwendbar ist, wenn gilt $x_n \neq \bar{x}$. Für $x_n = \bar{x}$ ist $x_n - \bar{x} = 0$ und damit der Fehler auf den Mittelwert auch. $\Delta(\Delta \bar{x})$ ist der Fehler auf die Messungen entlang der Profile und enthält den Fehler auf die Einzelmessungen und den Fehler auf den Mittelwert. $\Delta \text{Einzel}_{1/2}$ ist der Fehler auf die Messung 1/2 entlang der Profile und enthält nur den Fehler auf die Einzelmessung. ΔEinzel ist der Fehler auf die Messung am Basispunkt. Auf die Differenz $\Delta \text{Protonen}$, die die Differenz zwischen Messwert entlang des Profils und

des Referenzwerts an der Basisstation angibt, ergibt sich der Fehler

$$\Delta_{Protonen} = \pm \sqrt{(\Delta(\Delta\bar{x}))^2 + (\Delta_{Einzel})^2}. \quad (20)$$

Diese Formel kann verwendet werden, weil $\Delta(\Delta\bar{x})$ und Δ_{Einzel} keine Korrelation aufweisen.

Für das Torsionsmagnetometer wurde der Fehler auf B_z aus dem Zusammenhang $B = R \cdot Skt$ berechnet, in dem darauf die Größtfehlerabschätzung angewendet wird. Es ergibt sich folgende Formel

$$\Delta_{Torsion} = \pm(\Delta_{Skt} \cdot R + \Delta R \cdot Skt). \quad (21)$$

Eine Tabelle der daraus resultierenden Fehler kann im Anhang gefunden werden. Für das Fluxgate-Magnetometer ergibt sich der Fehler auf die Einzelmessung aus dem Ablesefehler $\Delta_{Ablesung}$ und aus der Neigung des Geräts $\Delta_{Neigung}$. Damit ergibt sich

$$\Delta_{Einzel} = \pm \sqrt{(\Delta_{Ablesung})^2 + (\Delta_{Neigung})^2}. \quad (22)$$

Des weiteren kann für die Messungen entlang der Profile mit jeweils zwei Messwerten Gleichung (17) und in Folge dessen auch (19) angewendet werden. Für den Fehler auf die Differenz zwischen den Messungen entlang der Profile und der Basisstation ergibt sich

$$\Delta_{Flux} = \pm \sqrt{(\Delta(\Delta\bar{x}))^2 + (\Delta_{Einzel})^2}. \quad (23)$$

Beim Gradiometer beträgt der Fehler gerade $\Delta B_{Gradio} = \pm 2\%$ des gemessenen vertikalen Gradienten, also $\Delta B_{Gradio} = \pm \frac{B_z}{50}$.

Wie bereits an den in der Auswertung vorgestellten Graphen der Profile mit den kaum sichtbaren Fehlerbalken erkennbar ist, ist der Fehler auf Grund von Ablesungsgenauigkeiten und Instrumentenfehlern im Vergleich zu den Änderungen auf Grund der Anomalie im Untergrund vernachlässigbar klein.

Tabellen zu den Fehlern können dem Anhang entnommen werden.

Bei der Auswertung mit dem Matlabskript herrscht vor allem das des öfteren bereits angesprochene Problem der Mehrdeutigkeit. Im Prinzip gibt es viele plausible und auch unplausible Modelle, die den selben Datensatz erklären. Anhand der einzelnen Diagramme der Profile kann eine ungefähre Aussage über die Lage des Basaltgangs im Bezug auf die Profilkoordinate gegeben werden und die Tiefe im Vergleich unter einander anzugeben. Diese Anhaltspunkte können im Modell bereits verwendet werden. Jedoch ist keine gesicherte Aussage über den

Verlauf und die Lage des Basaltgangs möglich. Es ist nichts genaues bekannt über die Näherungen, die das Matlabskript macht, weshalb auch keine Aussage über die Genauigkeit der Modellkurven, die das Programm ausgibt, getroffen werden kann.

7 Zusammenfassung

Mit Hilfe der Magnetik konnte ermittelt werden, dass der Basaltgang von Nordwesten nach Südosten verläuft. Auf Grund der Unterschiede in der Totalintensität bei den verschiedenen Profilen, kann davon ausgegangen werden, dass der Gang nach Süden hin näher an der Oberfläche liegt als am nördlichen Ende. Mit Hilfe des zur Verfügung gestellten Matlabskript wurden für Profil B und C Modelle erstellt, die die Anomalie erklären könnten. An dieser Stelle soll noch einmal auf die Mehrdeutigkeit bei der Magnetik hingewiesen werden. Viele Modelle beschreiben die Ergebnisse der Messung hinreichend gut. Wichtig für die Erstellung der Modelle in diesem Skript war die oberflächennahe Lage der Oberkante und dass die Breite des Ganges nur wenige Meter beträgt. Die Breite des Ganges kann in etwa durch die Breite der Anomalien der resultierenden Kurven der Messungen geschlossen werden. Weitere Parameter des Modells sind eine Tiefe von 59 m, ein Streichwinkel von 5° , ein Neigungswinkel von 88° und die magnetische Suszeptibilität $\kappa = 0.007$. Die gerade genannten Parameter wurden für die Modelle beider Profile identisch gewählt. Unterschiedlich war die Position des Koordinatenursprungs der Modellierung, woraus der schräge Verlauf des Ganges geschlossen werden kann, die Breite des Basaltgangs, die sich allerdings nur um einen halben Meter unterscheidet und die Tiefe, die sich schon deutlicher unterscheidet und woraus der Tiefenverlauf des Ganges geschlossen wurde.

Die Kartierung einer $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ großen Fläche über dem Basaltgang ergab einen interessanten Verlauf des Basaltgangs. Es wurde ein Abknicken des Basaltgangs erkannt.

Der Tagesgang muss bei den Magnetometern, die die Vertikalkomponente aufzeichnen, korrigiert werden. In diesem Versuch war das einzige Messgerät, das die Vertikalkomponente registriert das Fluxgate-Magnetometer, das von Haus aus einen sehr großen Fehler aufweist, weshalb es keinen Sinn macht die gemessenen Werte mit dem Tagesgang zu korrigieren.

Die Fehler auf die gemessenen Werte sind im Vergleich zur registrierten Anomalie verschwindend klein. Das Fluxgate-Magnetometer ist relativ ungenau im Vergleich zu den anderen Messgeräten, bietet aber den Vorteil, dass es klein und handlich ist. Das Protonen-Präzessions-Magnetometer ist deutlich genauer, aber auch deutlich größer und schwerer. Das Gradiometer ist ebenfalls relativ genau, gibt allerdings nur die Differenz zwischen oberem und unterem Sensor an, was zur Folge hat, dass es sich hauptsächlich für oberflächennahe Anomalien eignet. Insgesamt konnte die Fragestellung des Versuchs nach der Lage und des Verlaufs zufriedenstellend beantwortet werden.

Abbildungsverzeichnis

1	Komponenten des Magnetfeldes: T entspricht dem Betrag der magnetischen Flussdichte, \vec{X} und \vec{Y} sind die geographischen Nord- und Ostkomponenten, D und I sind Deklination und Inkliniation und \vec{H}_0 und \vec{B}_z (hier \vec{Z}) ist die Horizontal- bzw. Vertikalkomponente [1]	5
2	Kalibrierungskurve der Basisstation (1. Messung)	15
3	Kalibrierungskurve der Basisstation (2. Messung)	16
4	Die an der Basisstation gemessene Variation des Magnetfelds während der Messung	17
5	Änderung der Totalintensität entlang von Profil B bezogen auf die Referenzmessung an der Basisstation gemessen mit dem Protonen-Präzessions-Magnetometer (siehe Tabelle 6)	18
6	Änderung der vertikalen Komponente entlang von Profil B bezogen auf die Messung an der Basisstation, gemessen mit dem Fluxgate-Magnetometer (siehe Tabelle 6)	19
7	Änderung des vertikalen Gradienten entlang von Profil B gemessen mit dem Gradiometer	19
8	Änderung der Totalintensität entlang von Profil C bezogen auf die Referenzmessung an der Basisstation gemessen mit dem Protonen-Präzessions-Magnetometer (siehe Tabelle 6)	20
9	Änderung der Totalintensität entlang von Profil D bezogen auf die Referenzmessung an der Basisstation, gemessen mit dem Protonen-Präzessions-Magnetometer (siehe Tabelle 6)	21
10	Änderung des vertikalen Gradienten entlang von Profil D gemessen mit dem Gradiometer	22
11	Ergebnis der Kartierung einer $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ großen Fläche über dem Basaltgang	23
12	Modell zur Positionierung eines Ganges um die Messwerte entlang des Profils B zu erklären	24
13	Modell zur Erklärung der Anomalie entlang des Profils C	25
14	Modell zur Erklärung der Anomalie entlang des Profils C mit unrealistischen Annahmen	26
15	Lageskizze der verwendeten Profile bei der Magnetikmessung . . .	xxx
16	Übersicht über das Messgebiet	xxx

Literatur

- [1] J. Bartlakowski et al. 2014. Geophysikalische Laborübung.
- [2] Berckhemer, H. 2005. Grundlagen der Geophysik. 2. Auflage. Frankfurt: Fachbereich Geowissenschaften der Johann Wolfgang Goethe Universität.
- [3] Unbekannt. Unbekannt. Magnetische Suszeptibilität [online]. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. Verfügbar unter: <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/magnetische-suszeptibilitaet/9347>. [Zugriff am: 18.06.2016]
- [4] Unbekannt. Unbekannt. Bestimmung der realtiven Permeabilität μ_r , magnetischer Stoffe [online]. Uni Kassel. Verfügbar unter: <https://www.uni-kassel.de/eecs/fileadmin/datas/fb16/Fachgebiete/FSG/Download/Lehre/ETP1/MagnetischeWerkstoffe.pdf>. [Zugriff am: 18.06.2016]
- [5] Forbriger, T. et al. 2016. Skriptum zu den Geophysikalischen Geländeübungen 2016. Universität Karlsruhe.
- [6] mündliche Hinweise der Betreuer Svenja Schaneng und Tilman Metz während der Messung
- [7] Stölzer, M. 2001. Hinweise zur Fehlerrechnung [online]. Universität Halle. Verfügbar unter: <http://www.physik.uni-halle.de/Lehre/Grundpraktikum/gpfehler.htm>. [Zugriff am: 18.06.2016]
- [8] Unbekannt. Unbekannt. Magnetische Eigenschaften [online]. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. Verfügbar unter: <http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/magnetische-eigenschaften/9908>. [Zugriff am 19.06.2016]
- [9] Datenblatt des Gradiometers von Bartington Instruments [online]. Verfügbar unter: <http://www.bartington.kr/Literaturepdf/Datasheets/Grad601%20DS1800.pdf>. [Zugriff am: 19.06.2016]

A Anhang

Zu jeder der folgenden Tabellen ist auch eine Legende verfügbar.

Tagesgang

Tabelle 9: Messwerte und ihre Fehler an der Basisstation im Verlauf der Messung

Uhrzeit in h	Skt	ΔSkt	B_z in nT	ΔB_z
11,33	141,2	0,025	36205,09	0,014
11,58	141,38	0,025	36251,25	0,014
11,83	141,16	0,025	36194,84	0,014
12,08	141,19	0,025	36202,53	0,014
12,33	141,18	0,025	36199,96	0,014
12,58	141,24	0,025	36215,35	0,014
12,83	141,23	0,025	36212,78	0,014
13,08	141,2	0,025	36205,09	0,014
13,33	141,2	0,025	36205,09	0,014
14,17	141,17	0,025	36197,40	0,014
14,42	141,12	0,025	36184,58	0,014
14,67	141,15	0,025	36192,27	0,014
14,92	141,17	0,025	36197,40	0,014

Legende zu Tabelle 9

- Skt \equiv Skalenteile in Skt
- Δ Skt \equiv Fehler auf die Skalenteile in Skt
- B_z in nT \equiv Vertikalkomponente in nT
- ΔB_z in nT \equiv Fehler auf die Vertikalkomponente in nT

Profil B

Legende zu Tabelle 10

- Profilk. \equiv Profilkoordinate
- MW 1 \equiv Messwert 1
- MW 2 \equiv Messwert 2
- MWB 1 \equiv Messwert 1
- MWB 2 \equiv Messwert 2
- Mittel \equiv Mittelwert
- MittelB \equiv Mittelwert

Legende zu Tabelle 11

- Profilk. \equiv Profilkoordinate
- Diff. \equiv Differenz zwischen dem gemessen Wert entlang des Profils und der Basisstation
- D E 1 \equiv Δ Einzel 1
- D E 2 \equiv Δ Einzel 2
- Delta M \equiv Δ Mittel
- Delta Flux \equiv Δ Flux

Legende zu Tabelle 12

- Profilk. \equiv Profilkoordinate
- MW 1 \equiv Messwert 1
- MW 2 \equiv Messwert 2
- Mittel \equiv Mittelwert

Legende zu Tabelle 13

- Profilk. \equiv Profilkoordinate
- Diff. \equiv Differenz zwischen dem gemessen Wert entlang des Profils und der Basisstation
- D Einzel \equiv Δ Einzel
- Delta Mittel \equiv Δ Mittel

- Delta Protonen $\equiv \Delta$ Protonen

Legende zu Tabelle 14

- Profilk. \equiv Profilkoordinate
- vert. Grad. \equiv vertikaler Gradient
- Delta Grad. $\equiv \Delta$ Grad

Tabelle 10: Messwerte entlang von Profil B in Skt und nT sowie der ermittelte Mittelwert gemessen mit dem Fluxgate-Magnetometer

Profilk./m	MW 1/Skt	MW 2/Skt	MWB 1/nT	MWB 2/nT	Mittel/Skt	MittelB/nT
0	750	745	2106	2091,96	747,5	2098,98
1	720	730	2021,76	2049,84	725	2035,8
2	700	710	1965,6	1993,68	705	1979,64
3	700	700	1965,6	1965,6	700	1965,6
4	710	710	1993,68	1993,68	710	1993,68
5	720	720	2021,76	2021,76	720	2021,76
6	750	740	2106	2077,92	745	2091,96
7	740	750	2077,92	2106	745	2091,96
8	760	760	2134,08	2134,08	760	2134,08
9	780	790	2190,24	2218,32	785	2204,28
10	810	810	2274,48	2274,48	810	2274,48
11	860	870	2414,88	2442,96	865	2428,92
12	950	950	2667,6	2667,6	950	2667,6
12,5	1030	1040	2892,24	2920,32	1035	2906,28
13	1120	1110	3144,96	3116,88	1115	3130,92
13,5	1200	1200	3369,6	3369,6	1200	3369,6
14	1320	1240	3706,56	3481,92	1280	3594,24
14,5	1300	1300	3650,4	3650,4	1300	3650,4
15	1550	1560	4352,4	4380,48	1555	4366,44
15,5	1250	1240	3510	3481,92	1245	3495,96
16	1200	1210	3369,6	3397,68	1205	3383,64
16,5	1150	1150	3229,2	3229,2	1150	3229,2
17	1100	1090	3088,8	3060,72	1095	3074,76
17,5	1040	1040	2920,32	2920,32	1040	2920,32
18	1250	1290	3510	3622,32	1270	3566,16
18,5	950	940	2667,6	2639,52	945	2653,56
19	900	900	2527,2	2527,2	900	2527,2
20	850	850	2386,8	2386,8	850	2386,8
21	810	810	2274,48	2274,48	810	2274,48
22	790	780	2218,32	2190,24	785	2204,28
23	760	770	2134,08	2162,16	765	2148,12
24	750	760	2106	2134,08	755	2120,04
25	750	750	2106	2106	750	2106
26	750	740	2106	2077,92	745	2091,96
27	740	740	2077,92	2077,92	740	2077,92
28	720	730	2021,76	2049,84	725	2035,8
29	950	960	2667,6	2695,68	955	2681,64
30	720	700	2021,76	1965,6	710	1993,68

Tabelle 11: Fehler der Messwerte auf die Messwerte des Fluxgate-Magnetometers entlang von Profil B

Profilk./m	Diff./nT	D E 1/nT	D E 2/nT	Delta M/nT	Delta Flux/nT
0	-7,02	40,60	40,43	8,16	33,02
1	-70,2	39,60	39,93	4,01	32,24
2	-126,36	38,94	39,27	3,94	32,23
3	-140,4	38,94	38,94	0	31,99
4	-112,32	39,27	39,27	0	31,99
5	-84,24	39,60	39,60	0	31,99
6	-14,04	40,60	40,27	4,07	32,25
7	-14,04	40,27	40,60	4,07	32,25
8	28,08	40,94	40,94	0	31,99
9	98,28	41,62	41,96	4,21	32,27
10	168,48	42,65	42,65	0	31,99
11	322,92	44,39	44,75	4,49	32,31
12	561,6	47,62	47,62	0	31,99
12,5	800,28	50,55	50,92	5,11	32,40
13	1024,92	53,92	53,54	5,41	32,45
13,5	1263,6	56,97	56,97	0	31,99
14	1488,24	61,61	58,51	0,76	32,00
14,5	1544,4	60,83	60,83	0	31,99
15	2260,44	70,69	71,09	7,14	32,78
15,5	1389,96	58,89	58,51	5,91	32,53
16	1277,64	56,97	57,35	5,76	32,51
16,5	1123,2	55,06	55,06	0,00	31,99
17	968,76	53,17	52,79	5,34	32,44
17,5	814,32	50,92	50,92	0	31,99
18	1460,16	58,89	60,44	1,50	32,03
18,5	547,56	47,62	47,25	4,78	32,35
19	421,2	45,81	45,81	0	31,99
20	280,8	44,04	44,04	0	31,99
21	168,48	42,65	42,65	0	31,99
22	98,28	41,96	41,62	4,21	32,27
23	42,12	40,94	41,28	4,14	32,26
24	14,04	40,60	40,94	4,11	32,26
25	0	40,60	40,60	0	31,99
26	-14,04	40,60	40,27	4,073	32,25
27	-28,08	40,27	40,27	0	31,99
28	-70,2	39,60	39,93	4,01	32,24
29	575,64	47,62	47,98	4,81	32,35
30	-112,32	39,60	38,94	1,98	32,05

Tabelle 12: Messwerte entlang von Profil B und der errechnete Mittelwert gemessen mit dem Protonen-Magnetometer

Profilk./m	MW 1/nT	MW 2/nT	Mittel/nT
0	48220	48222	48221
1	48217	48218	48217,5
2	48229	48227	48228
3	48240	48238	48239
4	48256	48258	48257
5	48283	48280	48281,5
6	48315	48318	48316,5
7	48359	48358	48358,5
8	48419	48419	48419
9	48498	48500	48499
10	48594	48603	48598,5
10,5	48667	48668	48667,5
11	48743	48737	48740
11,5	48817	48818	48817,5
12	48900	48902	48901
12,5	48976	48975	48975,5
13	49067	49059	49063
13,5	49121	49126	49123,5
14	49165	49167	49166
14,5	49171	49171	49171
15	49150	49149	49149,5
15,5	49101	49097	49099
16	49036	49033	49034,5
16,5	48955	48958	48956,5
17	48863	48865	48864
17,5	48777	48780	48778,5
18	48702	48698	48700
18,5	48632	48628	48630
19	48556	48552	48554
20	48434	48430	48432
21	48355	48356	48355,5
22	48286	48284	48285
23	48238	48239	48238,5
24	48208	48209	48208,5
25	48185	48185	48185
26	48168	48167	48167,5
27	48150	48149	48149,5
28	48136	48134	48135
29	48125	48126	48125,5
30	48115	48116	48115,5

Tabelle 13: Fehler auf die Messwerte entlang von Profil B gemessen mit dem Protonen-Präzessions-Magnetometer

Profilk./m	Diff./nT	D Einzel/nT	Delta Mittel/nT	Delta Protonen/nT
0	-706	10	14,14	17,32
1	-709,5	10	28,28	30
2	-699	10	14,14	17,32
3	-688	10	14,14	17,32
4	-670	10	14,14	17,32
5	-645,5	10	9,43	13,74
6	-610,5	10	9,43	13,74
7	-568,5	10	28,28	30
8	-508	10	0	10
9	-428	10	14,14	17,32
10	-328,5	10	3,14	10,48
10,5	-259,5	10	28,28	30
11	-187	10	4,71	11,06
11,5	-109,5	10	28,28	30
12	-26	10	14,14	17,32
12,5	48,5	10	28,28	30
13	136	10	3,54	10,61
13,5	196,5	10	5,66	11,49
14	239	10	14,14	17,32
14,5	244	10	0	10
15	222,5	10	28,284	30
15,5	172	10	7,071	12,25
16	107,5	10	9,428	13,74
16,5	29,5	10	9,428	13,74
17	-63	10	14,142	17,32
17,5	-148,5	10	9,428	13,74
18	-227	10	7,071	12,25
18,5	-297	10	7,071	12,25
19	-373	10	7,071	12,25
20	-495	10	7,071	12,25
21	-571,5	10	28,284	30
22	-642	10	14,142	17,32
23	-688,5	10	28,284	30
24	-718,5	10	28,284	30
25	-742	10	0	10
26	-759,5	10	28,28	30
27	-777,5	10	28,28	30
28	-792	10	14,14	17,32
29	-801,5	10	28,28	30
30	-811,5	10	28,28	30

Tabelle 14: Messwerte und ihre Fehler entlang des Profils B gemessen mit dem Gradiometer

Profilk./m	vert. Grad./nT	Delta Grad.
0	-35	-0,7
1	-48	-0,96
2	-52	-1,04
3	-40	-0,8
4	-48	-0,96
5	-44	-0,88
6	-54	-1,08
7	-75	-1,5
8	-92	-1,84
9	-120	-2,4
10	-96	-1,92
11	-64	-1,28
12	296	5,92
13	621	12,42
14	293	5,86
15	170	3,4
16	20	0,4
17	-83	-1,66
18	-107	-2,14
19	-108	-2,16
20	-91	-1,82
21	-85	-1,7
22	-70	-1,4
23	-59	-1,18
24	-49	-0,98
25	-46	-0,92
26	-37	-0,74
27	-34	-0,68
28	-25	-0,5
29	-25	-0,5

Profil C

Legende zu Tabelle 15

- Profilk. \equiv Profilkoordinate
- MW 1 \equiv Messwert 1
- MW 2 \equiv Messwert 2
- Mittel \equiv Mittelwert

Legende zu Tabelle 16

- Profilk. \equiv Profilkoordinate
- Diff. \equiv Differenz zwischen dem gemessen Wert entlang des Profils und der Basisstation
- Delta Einzel $\equiv \Delta$ Einzel
- Delta Mittel $\equiv \Delta$ Mittel
- Delta Protonen $\equiv \Delta$ Protonen

Tabelle 15: Messwerte entlang des Profils C und dem errechneten Mittelwert
gemessen mit dem Protonen-Präzessions-Magnetometer

Profilk./m	MW 1/nT	MW 2/nT	Mittel/nT
0	48420	48421	48420,5
1	48486	48484	48485
2	48540	48540	48540
3	48607	48612	48609,5
4	48683	48682	48682,5
5	48751	48749	48750
6	48786	48790	48788
7	48801	48805	48803
8	48784	48787	48785,5
8,5	48761	48767	48764
9	48732	48732	48732
9,5	48704	48703	48703,5
10	48667	48665	48666
10,5	48634	48631	48632,5
11	48589	48590	48589,5
11,5	48550	48552	48551
12	48513	48511	48512
12,5	48471	48471	48471
13	48451	48453	48452
13,5	48416	48419	48417,5
14	48398	48401	48399,5
14,5	48371	48373	48372
15	48336	48338	48337
15,5	48341	48346	48343,5
16	48328	48328	48328
17	48294	48296	48295
18	48273	48275	48274
19	48250	48251	48250,5
20	48232	48233	48232,5
21	48219	48224	48221,5
22	48209	48211	48210
23	48200	48201	48200,5
24	48187	48190	48188,5
25	48180	48178	48179
26	48171	48172	48171,5
27	48163	48164	48163,5

Tabelle 16: Fehler auf die Messwerte des Protonen-Präzession-Magnetometers entlang von Profil C

Profilk./m	Diff./nT	Delta Einzel/nT	Delta Mittel/nT	Delta Protonen/nT
0	493,5	10	28,28	30
1	558	10	14,14	17,32
2	613	10	0	10,00
3	682,5	10	5,66	11,49
4	755,5	10	28,28	30
5	823	10	14,14	17,32
6	861	10	7,07	12,25
7	876	10	7,07	12,24
8	858,5	10	9,43	13,74
8,5	837	10	4,71	11,06
9	805	10	0	10
9,5	776,5	10	28,28	30
10	739	10	14,14	17,32
10,5	705,5	10	9,43	13,74
11	662,5	10	28,28	30
11,5	624	10	14,14	17,32
12	585	10	14,14	17,32
12,5	544	10	0,00	10
13	525	10	14,14	17,32
13,5	490,5	10	9,43	13,74
14	472,5	10	9,43	13,74
14,5	445	10	14,14	17
15	410	10	14,14	17
15,5	416,5	10	5,65	11
16	401	10	0	10
17	368	10	14,14	17,32
18	347	10	14,14	17,32
19	323,5	10	28,28	30
20	305,5	10	28,28	30
21	294,5	10	5,65	11,49
22	283	10	14,14	17,32
23	273,5	10	28,28	30
24	261,5	10	9,42	13,74
25	252	10	14,14	17,32
26	244,5	10	28,28	30
27	236,5	10	28,28	30

Profil D

Legende zu Tabelle 17

- Profilk. \equiv Profilkoordinate
- MW 1 \equiv Messwert 1
- MW 2 \equiv Messwert 2
- Mittel \equiv Mittelwert

Legende zu Tabelle 18

- Pk. \equiv Profilkoordinate
- Diff. \equiv Differenz zwischen dem gemessen Wert entlang des Profils und der Basisstation
- D E \equiv Δ Einzel
- D M \equiv Δ Mittel
- D P \equiv Δ Protonen

Legende zu Tabelle 19

- Profilk. \equiv Profilkoordinate
- vert. Grad. \equiv vertikaler Gradient
- Delta Grad. \equiv Δ Grad

Hinweis zu Tabelle17: Bei Profilkoordinate 19.5 m wurden mehrere Messungen getätigt. Die weiteren Messwerte waren 49055 nT und 49044 nT. Es wurden die beiden Messungen in Tabelle 17 gewählt, da diese am besten zueinander passen.

Tabelle 17: Messwerte entlang von Profil D und der errechnete Mittelwert gemessen mit dem Protonen-Präzessions-Magnetometer

Profilk./m	MW 1/nT	MW 2/nT	Profilk./m	MW 1/nT	MW 2/nT
0	48145	48143	19	48932	48941
1	48134	48132	19,5	49083	49085
2	48128	48128	20	49176	49166
3	48126	48123	20,5	49299	49290
4	48122	48122	21	49389	49379
5	48123	48123	21,5	49448	49450
6	48121	48122	22	49491	49490
7	48123	48124	22,5	49513	49510
8	48129	48129	23	49520	49516
9	48123	48123	23,5	49505	49505
10	48144	48144	24	49490	49491
11	48159	48159	24,5	49476	49476
11,5	48172	48170	25	49448	49448
12	48181	48182	25,5	49400	49416
12,5	48201	48200	26	49365	49371
13	48218	48216	26,5	49257	49256
13,5	48241	48238	27	49155	49154
14	48263	48262	27,5	49031	49037
14,5	48289	48288	28	48906	48898
15	48314	48314	28,5	48772	48789
15,5	48356	48352	29	48657	48680
16	48399	48394	29,5	48579	48581
16,5	48461	48457	30	48493	48494
17	48513	48510	30,5	48442	48437
17,5	48617	48610	31	48382	48391
18	48707	48698	31,5	48344	48343
18,5	48825	48824	32	48301	48306

Tabelle 18: Fehler auf die Messwerte entlang des Profils D gemessen mit dem Protonen-Präzessions-Magnetometer

Pk/m	Diff/nT	D E/nT	D M/nT	D P/nT	Pk/m	Diff/nT	D E/nT	D M/nT	D P/nT
0	217	10	14,14	17,32	19	1009,50	10	3,14	10,48
1	206	10	14,14	17,32	19,5	1139,75	10	0,70	10,02
2	201	10	0,00	10,00	20	1244,00	10	2,83	10,39
3	197,5	10	9,43	13,74	20,5	1367,50	10	3,14	10,48
4	195	10	0,00	10,00	21	1457,00	10,0	2,8	10,4
5	196	10	0,00	10,00	21,5	1522,00	10,0	14,1	17,3
6	194,5	10	28,28	30,00	22	1563,50	10,0	28,3	30,0
7	196,5	10	28,28	30,00	22,5	1584,50	10,0	9,4	13,7
8	202	10	0,00	10	23	1591,00	10,0	7,1	12,2
9	196	10	0,00	10,00	23,5	1578,00	10,0	0,0	10,0
10	217	10	0,00	10,00	24	1563,50	10,0	28,3	30,0
11	232	10	0,00	10,00	24,5	1549,00	10,0	0,0	10,0
11,5	244	10	14,14	17,32	25	1521,00	10,0	0,0	10,0
12	254,5	10	28,28	30,00	25,5	1481,00	10,0	1,8	10,2
12,5	273,5	10	28,28	30,00	26	1441,00	10,0	4,7	11,1
13	290	10	14,14	17,32	26,5	1329,50	10,0	28,3	30,0
13,5	312,5	10	9,43	13,74	27	1227,50	10,0	28,3	30,0
14	335,5	10	28,28	30,00	27,5	1107,00	10,0	4,7	11,1
14,5	361,5	10	28,28	30,00	28	975,00	10,0	3,5	10,6
15	387	10	0,00	10	28,5	853,50	10,0	1,7	10,1
15,5	427	10	7,07	12,247	29	741,50	10,0	1,2	10,1
16	469,5	10	5,66	11,489	29,5	653,00	10,0	14,1	17,3
16,5	532	10	7,07	12,247	30	566,50	10,0	28,3	30,0
17	584,5	10	9,43	13,744	30,5	512,50	10	5,66	11,49
17,5	686,5	10	4,04	10,785	31	459,50	10	3,14	10,48
18	775,5	10	3,14	10,482	31,5	416,50	10	28,28	30,0
18,5	897,5	10	28,28	30,000	32	376,50	10	5,66	11,49

Tabelle 19: Messwerte und ihre Fehler entlang des Profils D gemessen mit dem Gradiometer

Profilk./m	Vert. Grad./nT	Delta Grad.
0	-51	-1,02
1	-50	-1
2	-34	-0,68
3	-20	-0,4
4	-33	-0,66
5	-19	-0,38
6	-20	-0,4
7	-37	-0,74
8	-33	-0,66
9	-56	-1,12
10	-55	-1,1
11	-57	-1,14
12	-53	-1,06
13	-69	-1,38
14	-111	-2,22
15	-119	-2,38
16	-159	-3,18
17	-56	-1,12
18	73	1,46
19	143	2,86
20	163	3,26
21	443	8,86
22	570	11,4
23	188	3,76
24	459	9,18
25	507	10,14
26	659	13,18
27	35	0,7
28	-184	-3,68
29	-149	-2,98

Kartierung

Legende zur Tabelle der Kartierung

- Position in m nach rechts \equiv Profilkoordinate in südlicher Richtung
- Position in m nach links \equiv Profilkoordinate in östlicher Richtung

Position in m	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
0,125	-108	-125	-151	-105	-109	-95	-86	-95	-103	-91	-97	-126	-119	-128	-117	-101	-105	-112	-120	-105
0,250	-99	-128	-147	-97	-100	-98	-85	-95	-105	-89	-96	-132	-122	-130	-121	-102	-105	-116	-123	-110
0,375	-87	-130	-136	-91	-94	-97	-85	-96	-107	-85	-96	-128	-123	-131	-125	-104	-106	-121	-124	-116
0,500	-77	-131	-119	-86	-89	-95	-85	-96	-107	-80	-95	-112	-124	-133	-128	-107	-109	-125	-125	-120
0,625	-74	-130	-97	-81	-83	-93	-82	-97	-104	-75	-94	-95	-125	-136	-131	-112	-114	-127	-126	-123
0,750	-79	-127	-82	-79	-75	-91	-80	-96	-101	-72	-92	-83	-127	-139	-132	-118	-120	-129	-129	-126
0,875	-84	-121	-78	-79	-69	-86	-79	-94	-98	-71	-92	-74	-129	-141	-132	-122	-126	-131	-132	-127
1,000	-88	-112	-89	-80	-64	-80	-77	-90	-95	-73	-91	-67	-131	-142	-130	-126	-135	-129	-135	-128
1,125	-85	-102	-102	-79	-57	-75	-75	-83	-90	-74	-90	-63	-129	-136	-126	-133	-143	-127	-138	-128
1,250	-74	-92	-108	-75	-52	-71	-73	-79	-84	-75	-89	-65	-124	-128	-124	-140	-148	-126	-143	-127
1,375	-52	-82	-104	-70	-48	-66	-69	-77	-77	-76	-87	-71	-116	-118	-123	-144	-147	-126	-148	-124
1,500	-27	-78	-93	-67	-46	-55	-66	-77	-73	-78	-84	-78	-108	-111	-121	-143	-144	-128	-153	-118
1,625	-10	-79	-79	-66	-47	-41	-64	-78	-73	-79	-79	-83	-101	-105	-119	-142	-140	-130	-160	-109
1,750	-4	-88	-66	-68	-50	-26	-59	-80	-76	-76	-72	-87	-95	-100	-119	-140	-138	-133	-167	-96
1,875	-8	-103	-55	-75	-52	-11	-54	-83	-81	-66	-63	-90	-90	-98	-121	-134	-137	-134	-169	-84
2,000	-15	-114	-45	-85	-46	0	-50	-84	-85	-51	-57	-87	-87	-99	-124	-122	-135	-130	-167	-73
2,125	-19	-113	-28	-88	-32	11	-44	-79	-87	-39	-57	-75	-85	-100	-123	-111	-131	-127	-165	-66
2,250	-20	-107	-8	-79	-12	21	-40	-70	-90	-37	-57	-60	-84	-101	-119	-104	-125	-128	-162	-64
2,375	-13	-99	10	-61	11	26	-35	-59	-92	-39	-57	-50	-85	-107	-111	-104	-116	-133	-158	-66
2,500	6	-85	31	-37	38	26	-27	-48	-90	-41	-56	-44	-85	-114	-102	-107	-102	-139	-152	-70
2,625	40	-68	55	-8	69	21	-12	-37	-80	-41	-55	-40	-85	-121	-93	-109	-85	-143	-139	-77
2,750	82	-48	78	25	104	13	8	-29	-63	-38	-51	-35	-86	-128	-86	-105	-68	-140	-120	-82
2,875	132	-20	105	68	144	10	34	-20	-44	-37	-43	-31	-89	-133	-78	-92	-51	-128	-98	-82
3,000	192	37	138	117	191	23	66	-9	-25	-40	-30	-30	-96	-134	-72	-79	-32	-115	-83	-76
3,125	255	122	177	166	240	54	106	4	-9	-45	-13	-34	-100	-132	-70	-69	-15	-100	-70	-66
3,250	308	217	222	216	283	99	156	37	8	-43	0	-43	-103	-130	-71	-59	-1	-80	-52	-54
3,375	356	305	271	266	321	152	215	82	30	-28	9	-47	-102	-126	-69	-46	11	-54	-34	-39
3,500	400	375	320	314	362	211	280	125	55	-1	18	-45	-99	-116	-61	-28	22	-21	-12	-25
3,625	441	428	367	366	417	275	349	169	82	33	29	-36	-93	-97	-46	-8	31	18	12	-6
3,750	481	475	413	423	491	343	417	219	112	75	42	-25	-86	-71	-26	13	38	65	43	20
3,875	522	522	467	479	574	421	465	277	149	125	53	-15	-75	-39	0	41	46	120	79	60
4,000	564	571	532	531	640	497	499	337	211	178	66	-7	-51	2	36	68	56	175	111	109

Position in m	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
4,125	597	615	600	576	676	561	541	393	300	235	86	5	-9	51	77	93	70	224	142	162
4,250	614	662	656	614	690	616	593	446	377	287	114	26	49	93	116	121	88	266	179	213
4,375	630	699	698	652	690	655	643	488	438	333	141	55	112	131	149	159	111	307	221	264
4,500	646	709	710	680	682	676	691	522	499	369	167	91	175	169	184	209	140	347	267	324
4,625	657	695	703	697	670	686	730	565	557	409	199	131	235	211	232	277	177	395	314	393
4,750	662	677	684	704	650	691	755	619	611	464	243	174	290	261	303	366	225	449	356	466
4,875	649	666	662	703	605	697	744	668	660	524	298	224	343	317	393	463	288	491	382	530
5,000	604	655	633	681	534	688	689	684	697	579	362	285	395	370	474	538	369	512	390	567
5,125	512	627	588	615	462	642	621	666	709	614	424	348	442	411	535	596	454	525	393	579
5,250	402	550	522	524	395	576	554	637	697	640	481	413	482	445	592	650	531	530	398	581
5,375	331	449	456	436	330	504	488	602	682	666	536	476	521	482	649	700	598	532	404	582
5,500	292	363	399	361	272	424	422	560	657	684	587	532	563	525	698	740	650	535	411	580
5,625	255	299	352	297	221	339	352	510	623	690	630	576	603	575	732	759	689	535	416	580
5,750	219	251	307	242	182	257	281	450	579	682	665	611	637	626	741	751	716	521	417	584
5,875	190	217	259	193	157	189	225	390	522	643	674	639	667	669	714	711	719	490	416	594
6,000	167	192	211	159	145	154	204	341	453	577	636	652	685	686	668	657	696	456	414	610
6,125	149	175	172	143	140	145	197	307	387	512	573	650	668	675	625	602	658	427	409	624
6,250	136	170	149	138	137	145	192	282	342	465	521	641	615	645	590	556	618	400	406	637
6,375	125	168	135	134	139	149	189	264	317	435	489	628	552	613	560	517	574	374	408	651
6,500	109	166	124	128	148	155	194	254	308	417	469	613	498	582	532	481	526	351	413	669
6,625	92	162	115	125	165	163	206	251	306	404	458	595	458	554	499	446	475	334	418	694
6,750	79	155	108	127	180	173	223	258	309	393	454	571	430	527	462	415	424	324	422	718
6,875	75	149	104	135	190	186	240	273	319	383	451	539	410	498	427	393	380	319	422	719
7,000	80	144	102	143	182	199	255	288	332	376	446	497	396	471	404	381	351	315	414	685
7,125	87	128	97	149	151	209	263	298	345	373	436	455	387	447	388	367	333	309	402	629
7,250	88	103	87	153	114	214	260	300	350	371	425	419	377	423	369	349	318	299	389	568
7,375	77	73	69	155	86	215	251	298	350	368	410	391	359	399	345	332	303	289	376	511
7,500	55	38	42	156	72	213	245	297	345	362	390	365	330	378	324	318	290	274	355	456
7,625	25	4	13	156	68	208	244	299	332	352	374	343	296	358	303	304	279	252	320	399
7,750	-8	-22	-15	151	67	192	246	299	309	334	361	325	263	339	277	286	268	218	277	329
7,875	-38	-46	-40	133	67	161	242	299	279	307	351	315	229	320	245	262	254	180	243	244
8,000	-63	-67	-65	98	65	118	224	302	245	282	337	318	197	299	215	234	237	151	221	182

Position in m	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
8,125	-85	-85	-83	55	57	73	190	291	204	268	318	333	162	282	190	203	220	134	200	169
8,250	-102	-96	-91	10	40	29	149	270	166	256	296	355	131	269	166	172	197	127	181	180
8,375	-112	-101	-99	-34	14	-6	109	246	135	241	276	378	111	259	146	142	168	119	163	192
8,500	-120	-107	-111	-72	-15	-28	74	217	115	219	255	392	95	243	125	110	132	102	145	201
8,625	-124	-114	-124	-98	-39	-50	45	179	104	188	236	386	75	216	100	77	88	69	131	207
8,750	-127	-118	-134	-115	-58	-74	17	138	98	147	218	358	46	174	68	49	42	25	120	216
8,875	-131	-119	-138	-126	-74	-95	-7	98	92	100	204	315	13	121	36	33	4	-12	110	235
9,000	-134	-116	-138	-132	-84	-108	-25	75	75	61	187	258	-18	75	11	17	-20	-30	102	269
9,125	-134	-114	-138	-129	-89	-117	-33	50	48	32	165	191	-42	34	-7	-14	-44	-38	93	296
9,250	-129	-111	-139	-128	-88	-124	-52	14	26	4	144	126	-63	-3	-28	-52	-75	-49	84	307
9,375	-123	-111	-142	-126	-86	-134	-83	-20	4	-25	124	69	-82	-33	-52	-90	-109	-63	78	311
9,500	-122	-117	-144	-125	-85	-145	-111	-44	-22	-54	101	23	-96	-59	-73	-124	-146	-72	82	316
9,625	-126	-125	-146	-125	-91	-152	-127	-61	-52	-80	72	-13	-106	-81	-94	-153	-185	-70	95	325
9,750	-129	-132	-147	-125	-102	-148	-123	-81	-83	-101	30	-49	-116	-103	-117	-174	-205	-47	115	343
9,875	-130	-136	-149	-126	-110	-133	-101	-97	-108	-115	-19	-83	-128	-121	-133	-181	-200	-24	143	369
10,000	-129	-136	-149	-123	-110	-121	-87	-103	-120	-122	-59	-108	-133	-130	-138	-176	-196	-29	163	405

Datenblatt des Gradiometers

Grad-01-1000L Sensor

The Grad-01-1000L is a high stability fluxgate gradient sensor, with a 1m separation between the sensing elements and an effective sensitivity of 0.03nT/m. The exceptional temperature stability of this sensor ensures minimal drift during surveys and reduces the need for adjustment to a minimum. Each sensor contains electronics and non-volatile memory for calibration data storage, and can be operated independently, over long cables, if required.

The sensors may also be fitted to the Non-Magnetic Cart, also available from Bartington Instruments, for surveys over wider areas.



Specification

Number of axes	One (vertical)
Sensor element spacing	1m
Gradient range	±100nT/m or ± 1000nT/m full-scale
Bandwidth	DC to 14Hz with -40dB 50Hz/60Hz rejection
Sensitivity	0.03nT/m (max effective)
Calibration error	±2%
Maximum ambient field	±100µT
Drift	<1nT in 24 hours
Dimensions	38mm diameter x 1050mm in length
Weight	0.83kg
Connector	12-way Tajimi R04-R12M
Power supply current	60mA
Minimum sensor spacing in multi-sensor array	250mm between sensors

Kalibrierungsfaktor des Torsions-Magnetometers hand-schriftliche Auswertung

BEISPIEL ZUR FEHLERRECHNUNG

• 2. Messung

$$\text{Regression 1} : m_1 = \left| \frac{\Delta S_{\text{rel}}}{\Delta B} \right| = \frac{2,0\%}{526,92} = 3,95 \cdot 10^{-3} \frac{\text{nT}}{\text{Sut}}$$

$$\text{Regression 2} : m_2 = \left| \frac{\Delta S_{\text{rel}}}{\Delta B} \right| = \frac{1,98}{526,92} = 3,78 \cdot 10^{-3} \frac{\text{nT}}{\text{Sut}}$$

\Leftrightarrow Unterschied von 6%

Varianzunterschied: $R_1 = \frac{A}{m_1} = 253,16 \frac{\text{nT}}{\text{Sut}}$

~~$R_2 = \frac{A}{m_2} = 266,67 \frac{\text{nT}}{\text{Sut}}$~~

$\rightarrow \Delta R = R_2 - R_1 = 13,51 \frac{\text{nT}}{\text{Sut}}$
($\approx 5,06\%$)

$$\text{Fehler auf Regession} \quad \Delta m = \left| \frac{\partial m}{\partial A} \right| \Delta A + \left| \frac{\partial m}{\partial B} \right| \Delta B$$

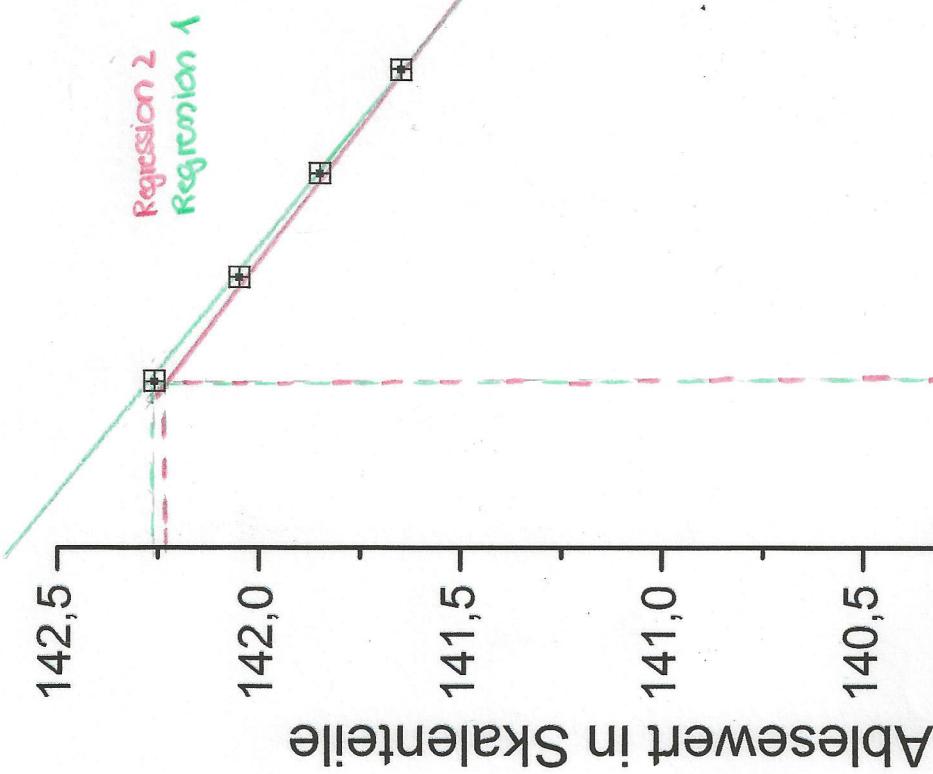
mit Ablesegenaugigkeit $\pm 2\text{m} \rightarrow \Delta F_{\text{Sut}} = \pm 0,04 \text{ Sut}$
 $\Delta F_B = \pm 7,69 \text{ nT}$

$$\Delta F_m = \pm 1,83 \cdot 10^{-5} \frac{\text{nT}}{\text{Sut}}$$

$$\Delta F_{m_2} = \pm 2,11 \cdot 10^{-5} \frac{\text{nT}}{\text{Sut}}$$

$$\rightarrow \Delta R_1 = \left| 1 - \frac{\Delta F_{m_2}}{m_2^2} \right| = \pm 1,17 \frac{\text{nT}}{\text{Sut}}$$

$$\Delta R_2 = \left| 1 - \frac{\Delta F_{m_2}}{m_2^2} \right| = 1,50 \frac{\text{nT}}{\text{Sut}}$$



Vertikalkomponente des Magnetfelds in nT

Handschriftliche Mitschriebe am Messtag

Magnetik

④ Basisstruktur

→ geogr. koordinaten

→ dt. Gitter

Basis

Basis - dY. Gitter

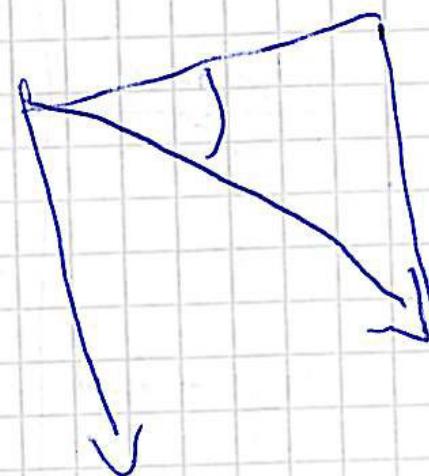
737

I / mA	Skalenteil / Skt	26,5 $\frac{\text{V}}{\text{mA}}$
-10	140,22	142,20
-8	140,43	142,05
-6,9	140,65	147,85
-4	140,84	147,65
-2	141,06	147,42
0	141,25	147,21
2	141,49	147,02
4	141,705	146,79
5,9	141,90	140,69
8	142,10	140,38
10	142,10	140,17
+ - 0,1	+ - 0,25	

⑦ erste Messung evtl falsch

② Write message

Basisstation Zeit	$\pm 7\text{ min}$	Sicht $\pm 0,025$	Ableser $\pm 0,75^\circ$
11 20		141,20	Manus
11 35		141,38	Manus
11 50		141,16	Arn-Kathrin
12 05		141,19	" "
12 20		747,18	" "
12 35		747,24	Hendrik
12 50		747,23	"
13 05		141,20	Jacob
13 20		141,20	Jacob
14 10		141,17	Maria
14 25		141,12	"
14 40		141,15	Maria
14 55		141,17	Hendrik



Fehler durch Schiefelebenen messweise
Genauigkeit des Instrumentes vom
Protonen-Präzisions-Magnetometer $\pm 10\text{ UT}$
durch Beobachtung der Trennwerte.



Lageskizze

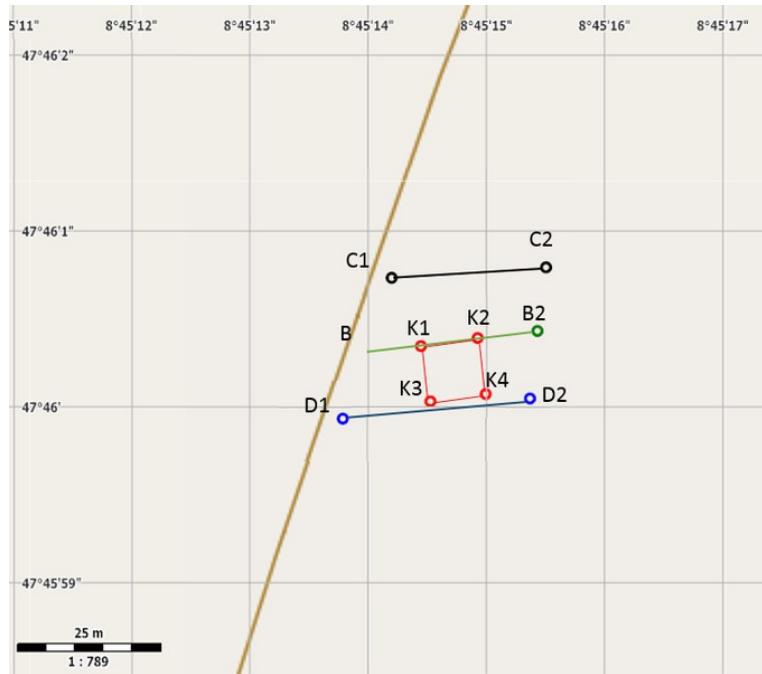


Abbildung 15: Lageskizze der verwendeten Profile bei der Magnetikmessung



Abbildung 16: Übersicht über das Messgebiet

Geophysikalische Geländeübungen

Jahr: 2016

Messgebiet/Standort: A59/1 Riedheim

Erklärung zu den schriftlichen Berichten, bestehend aus einer Gesamtübersicht und jeweils einem Protokoll zu den Versuchen Magnetik, Gravimetrie, Geoelektrik und Seismik.

Ich versichere wahrheitsgemäß, die Arbeit selbstständig angefertigt, alle benutzten Hilfsmittel vollständig und genau angegeben und alles kenntlich gemacht zu haben, was aus Arbeiten anderer unverändert oder mit Abänderungen entnommen wurde.

Alicia Rohnacher, 1805798, 19.06.16 A.Rohnacher
Name, Matrikelnummer, Datum, Unterschrift

Ann-kathrin Edrich, 1785471, 19.06.16, A.Edrich
Name, Matrikelnummer, Datum, Unterschrift