

Feldbericht Geophysik
Magnetfeldmessungen
Gruppe: EJ KLAA Wuhu

Eva Frisch (5791680), Julia Wurth (5770913), Lisa Dietl (5808892),
Anna Rieß (6099945), Kassandra Gamm (6131375)

Praktikumsdatum: 22.05.2022

Abgabedatum: 05.06.2022

Betreuer: Prof. P. Dietrich

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	4
2	Methoden	6
3	Ergebnisse	7
4	Diskussion	14
5	Zusammenfassung	18

Abbildungsverzeichnis

1	Untersuchungsfeld	4
2	Untersuchungsfeld aus der Vogelperspektive	5
3	Skizze des Untersuchungsfelds	5
4	Forward Model: Anomaliekarte und -querschnitt	6
5	Messungen des Gesamtfeldes: contour map	8
6	Messungen des Gesamtfeldes: korrigierte contour map	9
7	Messungen des vertikalen Gradienten: contour map	10
8	Messungen des vertikalen Gradienten: contour map	11
9	Messungen des Gesamtfeldes: Referenzmessungen nach der Zeit	12
10	Magnetfeldstärke über dem Profil bei 6 Meter. blau: Messdaten; rot: halber Wert des Extremums; gepunktet: Breite der 'Halbweite'	13
11	Magnetfeldstärke über dem Profil bei 6 Meter (links) und bei 18 m (rechts). blau: Messdaten; rot: halber Wert des Extremums	14
12	Karte des Oberhauser Magnetometers mit eingezeichnetem Rohr	16
13	Karte des Fluxgate Magnetometers mit eingezeichnetem Rohr	16
14	Untersuchungsfeld mit ermittelter Pipeline	18

1 Einführung

Ziel der Untersuchung ist die Lokalisierung einer Gaspipeline, welche durch Magnetisierung zu einer Anomalie im Erdmagnetfeld führt. Die ungefähre Lage dieser Gaspipeline ist dabei auf ein 20 m x 20 m Feld begrenzt, welches sich in der Nähe des Campus Morgenstelle der Eberhard-Karls-Universität befindet.

Zunächst wurde mithilfe von vier Maßbändern und einem Winkelprisma das quadratische Untersuchungsfeld markiert. Die Beschaffenheiten dieses Feldes waren keinesfalls homogen. Teile des Messgitters lagen im Wald, andere auf einem Weg, welcher von Fahrradfahren und Fußgängern genutzt wurde, außerdem war ein Hindernis in Form von Holzscheiten, siehe Abbildung 1, im Untersuchungsfeld.



Abbildung 1: Untersuchungsfeld

Die Seite a, siehe Abbildung 2, war dabei schon vorgegeben und diente zur Orientierung. Senkrecht zur Seite a wurden die Maßbänder mit je 1 Meter Abstand positioniert und dann von den Messgruppen abgelaufen, wobei im 1 Meter Abstand Messungen durchgenommen wurden. Insgesamt gab es also 441 Messpunkte. Darstellungen von Messungen im Untersuchungsfeld haben im Folgenden ihren Null-Punkt an der nord-östlichen Ecke und die x-Achse entspricht der Seite a.

Die Messungen der Anomalien wurden mit zwei Messmethoden bestimmt. Das Totalmagnetfeld wurde mittels eines Overhauser Magnetometers bestimmt. Weiterhin erfolgte die Messung des vertikalen Gradientenfeldes mithilfe eines Fluxgate Magnetometers.



Abbildung 2: Untersuchungsfeld aus der Vogelperspektive

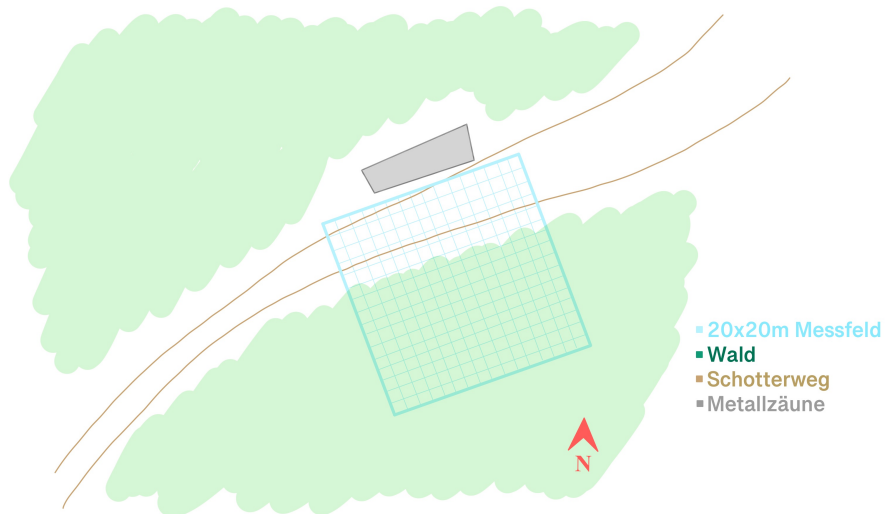


Abbildung 3: Skizze des Untersuchungsfelds

2 Methoden

Die Lokalisierung der Pipeline erfolgte mittels geomagnetischer Verfahren. Gemessen werden Abweichungen der Intensität des Erdmagnetfeldes (in nT) über der Untersuchungsfläche von einem Referenzpunkt außerhalb der Untersuchungsfläche. Abweichungen der Intensität haben ihren Ursprung in der Überlagerung des Erdmagnetfeldes mit dem Magnetfeld des unterirdischen magnetisierten Gegenstandes. Über einem im Vergleich zur Gesamterdoberfläche infinitesimal kleinen Messgitter (hier 20 x 20 m), kann die Intensität des Erdmagnetfeldes räumlich als näherungsweise konstant betrachtet werden. Abweichungen in der Intensität, sogenannte Anomalien, geben daher Rückschlüsse auf die Lage des gesuchten Objektes. Das gesuchte Objekt kann dabei entweder durch das externe Erdmagnetfeld magnetisiert werden (induzierte Magnetisierung) oder aber bereits magnetisiert sein (remanente Magnetisierung).

Bei induzierter Magnetisierung richten sich die Feldlinien des magnetisierten unterirdischen Objektes an den Feldlinien des Erdmagnetfeldes aus (sie laufen parallel). Anomaliekarten (siehe nachfolgende Abbildung "Forward Model") in Breitengraden, auf denen sich auch Tübingen befindet (Inklination: $64^{\circ}46'$; Deklination: $3^{\circ}19'$), zeigen typischerweise ein Maximum im Süden und ein Minimum im Norden.

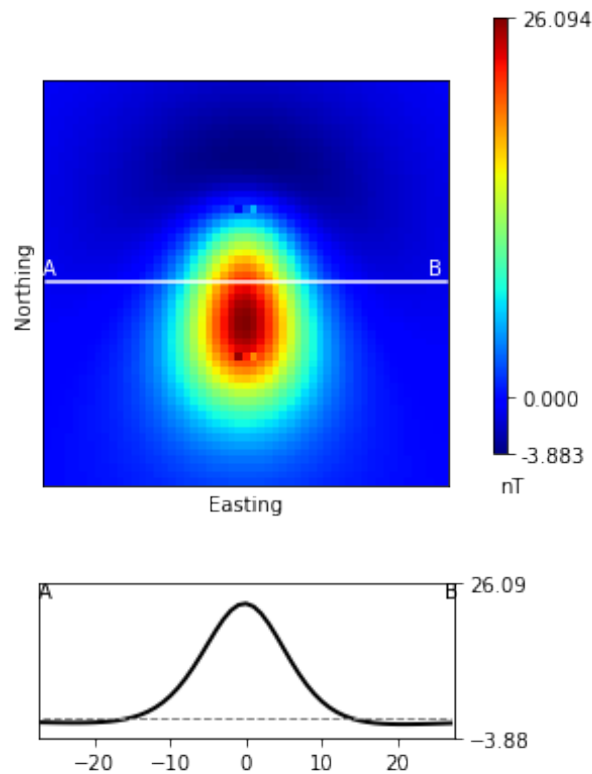


Abbildung 4: Forward Model: Anomaliekarte und -querschnitt

Im vorliegenden Fall ist davon auszugehen, dass die Pipeline (Stahlrohr mit ferromagnetischen Eigenschaften) remanent magnetisiert ist. Die Orientierung des Magnetfeldes hat sich während des Abkühlvorgangs bei der Herstellung des Rohres der Orientierung des externen Magnetfeldes am Herstellungsort angepasst. Es ist daher davon auszugehen, dass die Orientierung des Erdmagnetfeldes und der Pipeline am Untersuchungsort nicht zwangsläufig übereinstimmen (es sei denn, das Rohr ist in Tübingen gefertigt worden). Dies führt dazu, dass die Feldlinien des Erdmagnetfeldes und der Pipeline nicht parallel verlaufen und die Anomaliekarte nicht zwangsläufig ein Maximum im Süden und ein Minimum im Norden aufweisen muss.

Die zeitlichen Abweichungen, denen das Erdmagnetfeld (unter anderem aufgrund von Sonnenstürmen und deren ionisierenden Strahlung) unterliegt, wurden mittels Messungen an einem Referenzpunkt außerhalb der Untersuchungsfläche festgehalten. Die Messungen dazu erfolgten nach jedem Profilabschluss ca. alle 5-10 Minuten.

Die Messungen des Erdmagnetfeldes bzw. dessen Anomalien an der Untersuchungsfläche, erfolgten mit zwei unterschiedlichen Magnetometern:

1. Das Overhauser Magnetometer (Modell: GSM-19W) der Firma GEM Systems Inc.) wurde zur Messung der totalen Feldstärke verwendet. Das Magnetometer nutzt dabei das Kernpräzessionsverfahren von Protonen (Overhauser Effekt) und misst dabei nur die vertikale absolute Komponente des Magnetfeldes. Die Sensitivität liegt bei 0,022 nT. Dieses Magnetometer wurde auch zur Messung der Referenzwerte nach jedem Profilabschluss verwendet.
2. Das Fluxgate Magnetometer bzw. Förstersonde (Modell: FEREX 4.034 der Firma Foerster GmbH) ist ein Vektormagnetometer und kann im Unterschied zum Overhauser Magnetometer auch die waagerechten Komponenten (Richtung) des Magnetfelds messen. In der vorliegenden Untersuchung wurde jedoch nur die vertikale Komponente gemessen. Generell wird mit dem Fluxgate Magnetometer das Gradientenfeld (sprich die Änderungsrate) gemessen und ist damit nicht sensitiv gegenüber zeitlichen Änderungen des Erdmagnetfelds. Die Sensitivität des Gerätes liegt bei 1 nT.¹

3 Ergebnisse

Um einzelne Messwerte im Folgenden leichter benennen zu können, wird von Profilen und Messungen entlang dieser Profile gesprochen. Ein Profil beginnt an der in der Einführung beschriebenen, vorgegebenen Seite a des Messfeldes. Nummeriert werden die Profile entsprechend der Meter auf dem an Seite a angelegten Maßband. Profil 0 beginnt also bei 0m am Maßband der Seite a und erstreckt sich bis in den Wald. Bezieht man sich auf Abbildung 1 erstrecken die Profile sich also von links nach rechts.

¹Für weitere Informationen zur Funktionsweise der beiden Magnetometer und deren physikalischen Grundlagen siehe: Lowrie, W. (2007). Fundamentals of Geophysics (2nd edition).Cambridge University Press.S.322 f.

Um das Gesamtmagnetfeld möglichst frei von äußeren Einflüssen darzustellen, wurden die jeweiligen Referenzmessungen von den Profilen abgezogen. Aufgrund der bereits beschriebenen Beschaffenheit des Messfeldes war es nicht möglich an allen Punkten Messungen zu nehmen. Um die Daten dennoch mit MatLab darstellen zu können, wurden die fehlenden Werte mit Interpolationen ergänzt. Die daraus entstandene contour map ist in Abbildung 5 zu sehen.

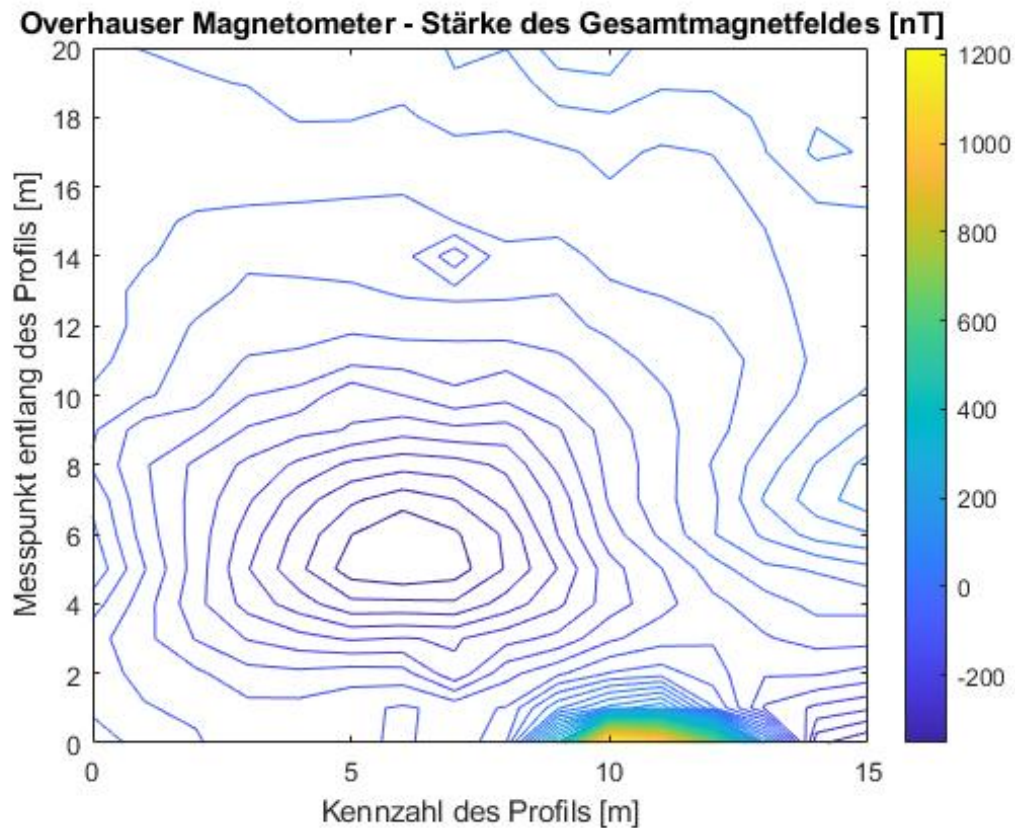


Abbildung 5: Messungen des Gesamtfeldes: contour map

Wie in Abbildung 5 zu sehen, sind nur 16 Profile der Messungen mit dem Overhauser Magnetometer dargestellt. Das liegt daran, dass der Akku des Messgeräts nach Profil 15 leer war und die restlichen Messungen nicht durchgeführt werden konnten.

Von Profil 8 bis Profil 14 ist auf den ersten Metern der Profile eine starke Anomalie zu sehen. An dieser Stelle standen direkt hinter dem Messfeld Metallzäune. Diese Metallzäune sind für diese starke Anomalie verantwortlich. Da sie für die Lokalisierung des Rohres irrelevant sind, wurden die entsprechenden Werte durch angenommene Werte ersetzt. So konnte die Auflösung der Darstellung verbessert werden. Die korrigierte contour map ist in Abbildung 6 dargestellt.

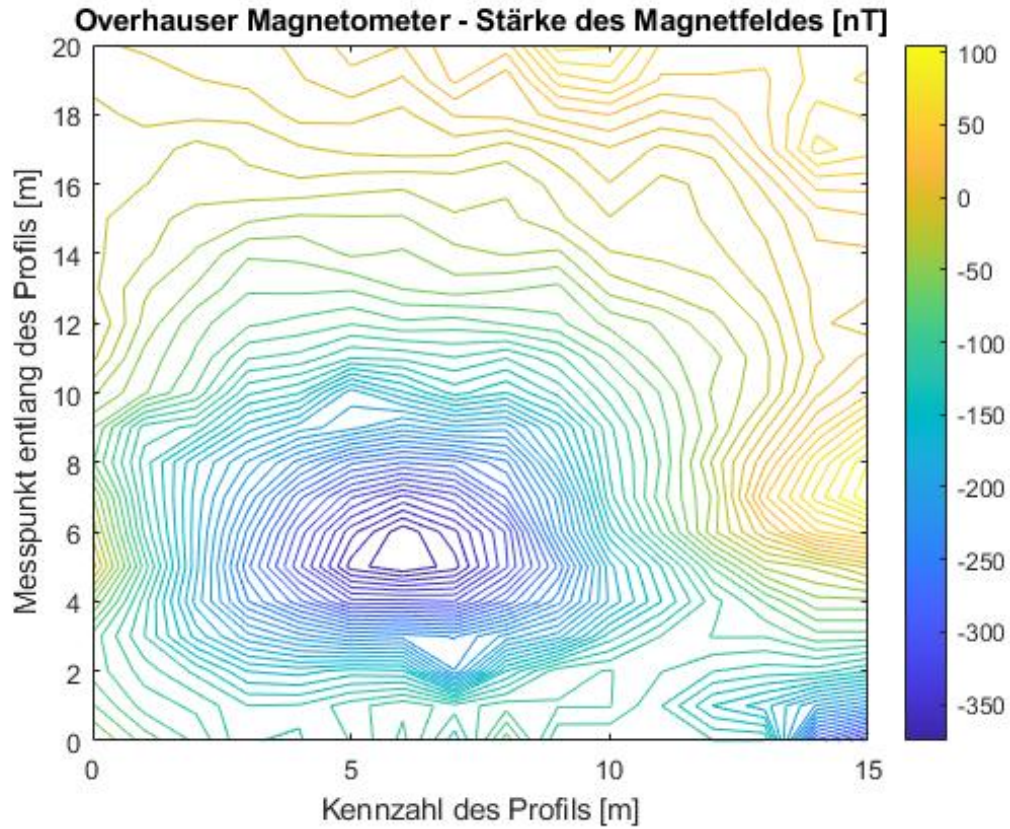


Abbildung 6: Messungen des Gesamtfeldes: korrigierte contour map

Ebenso wie mit dem Overhauser Magnetometer war es auch mit dem Fluxgate Magnetometer nicht möglich, an allen Punkten Messungen zu machen. Hier wurde analog vorgegangen, wie oben beschreiben. Außerdem wurde der Wert in Profil 5 bei $8m$ verändert. Dieser Wert schwankte beim Messen innerhalb von wenigen Zentimetern von $-1000nT$ bis $1000nT$. Eine mögliche Erklärung ist, dass an dieser Stelle eine oberflächennahe, für die vorliegende Untersuchung irrelevante, magnetische Anomalie liegt. Die daraufhin aus den Daten entstandene contour map ist in Abbildung 7 dargestellt.

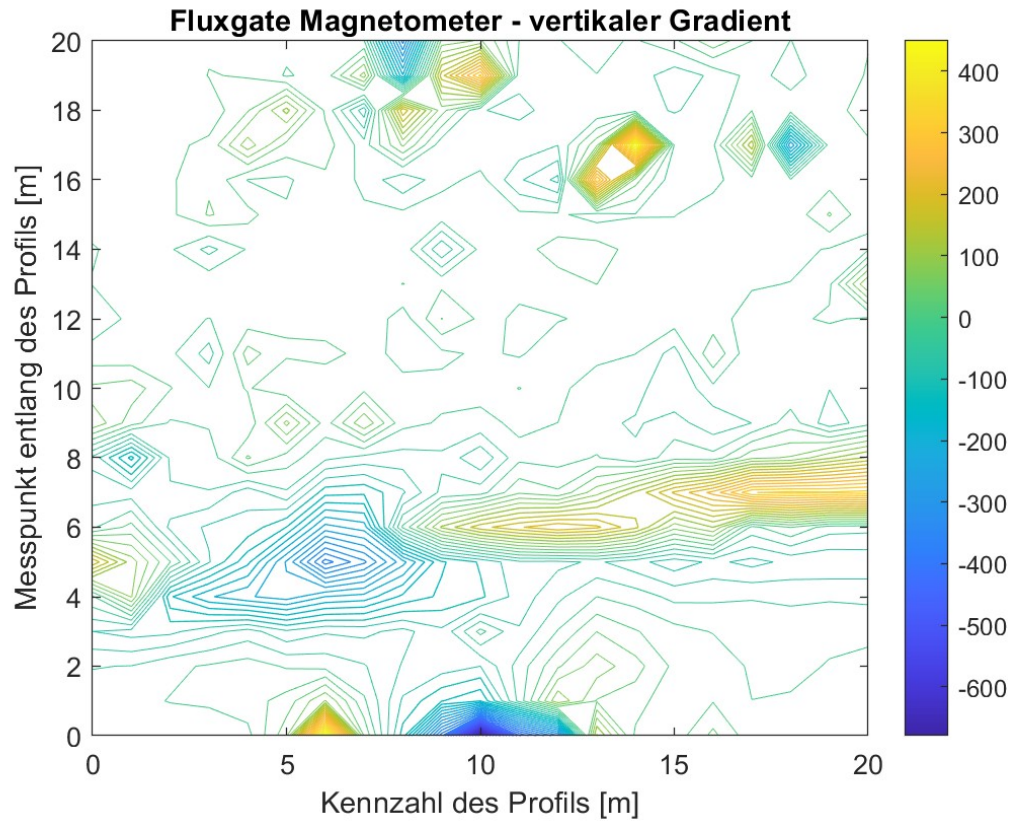


Abbildung 7: Messungen des vertikalen Gradienten: contour map

Ebenso wie bei dem Overhauser Magnetometer wurden hier in einem nächsten Schritt die von den Metallzäunen beeinflussten Daten korrigiert. Die daraus entstandene contour map ist in Abbildung 8 zu sehen.

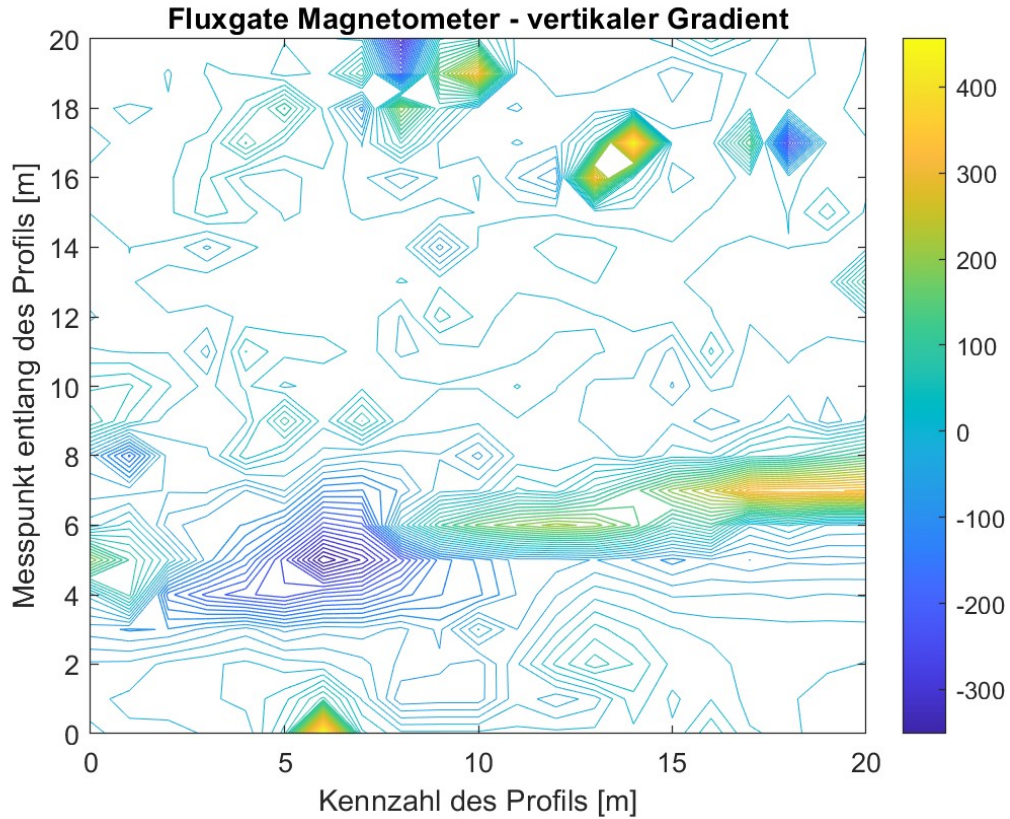


Abbildung 8: Messungen des vertikalen Gradienten: contour map

In Abbildung 9 sind die ortsfesten Referenzmessungen nach der Zeit dargestellt. Die Schwankungen bewegen sich im Bereich von ca. $20nT$. Eine Korrektur nach der zeitlichen Komponente ist nicht unbedingt notwendig. Da die Tendenz der Referenzmessungen allerdings steigend ist, wurde wie bereits beschrieben dennoch eine Korrektur durchgeführt.

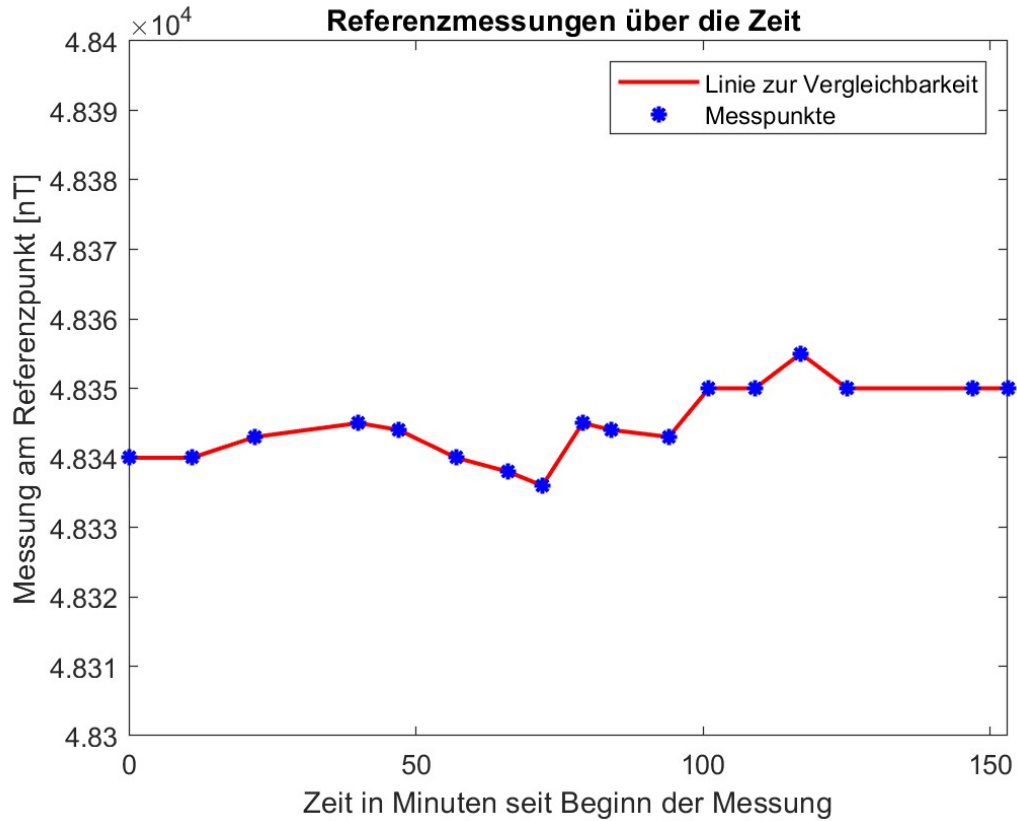


Abbildung 9: Messungen des Gesamtfeldes: Referenzmessungen nach der Zeit

Neben der Lage der Rohrleitung soll auch ihre Tiefe unter der Geländeoberfläche abgeschätzt werden. Hierfür wird die Methode der 'Halbweite' angewandt, die im Folgenden beschrieben wird. Von den Overhauser-Messdaten wird ein Profil über der Stelle mit dem Extremum analysiert. Von Interesse ist hier also das in Abbildung 6 deutlich werdende Minimum im Magnetfeld mit dem Zentrum bei Profil 6, Meter 5. Für die Tiefenbestimmung ist in Abbildung 10 die gemessene, bereinigte Magnetfeldstärke über das Profil bei 6 m aufgetragen. Im Feld entspricht das der Messreihe bei 6 m senkrecht zu Seite a.

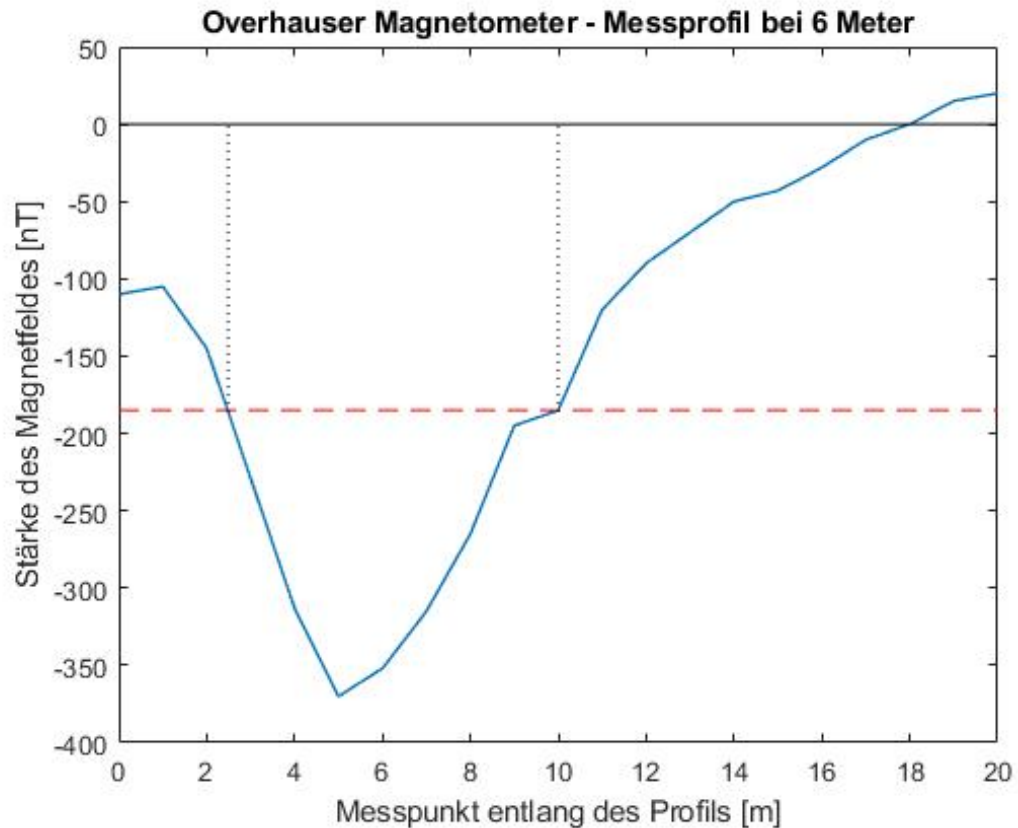


Abbildung 10: Magnetfeldstärke über dem Profil bei 6 Meter. blau: Messdaten; rot: halber Wert des Extremums; gepunktet: Breite der 'Halbweite'

Die Tiefe der Anomalie entspricht dann der breite der Kurve auf Höhe der Hälfte des Extremums. Das mit dem Overhauser gemessene Minimum liegt bei -370nT , die Halbbreite wird also bei -185nT abgelesen. Sie geht von 2,5 bis 10 und beträgt damit 7.5m .

Dieses Verfahren wird für die Messungen mit dem Fluxgate-Magnetometer wiederholt, um mehrere Messwerte vergleichen zu können. Die Profile sind in Abbildung 11 ebenfalls für das Minimum bei 6m und außerdem, da die Messreihe hier vollständig ist, auch für das Maximum bei 18m aufgetragen.

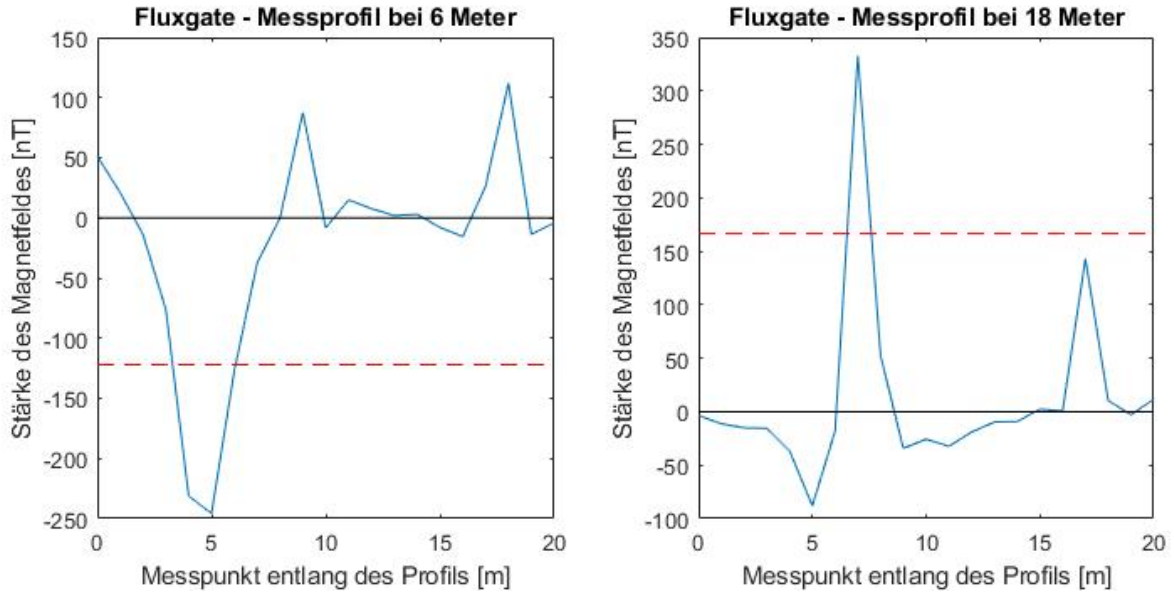


Abbildung 11: Magnetfeldstärke über dem Profil bei 6 Meter (links) und bei 18 m (rechts). blau: Messdaten; rot: halber Wert des Extremums

Das Fluxgate zeichnet bei 6m ein Minimum von $-245,6nT$ und bei 18m ein Maximum von $333,1nT$ auf. Die Halbbreite des Minimums beläuft sich auf $2,8m$ und die des Maximums auf $1m$. Durchschnittlich ergeben die FLuxgate Messungen also eine Tiefe der Anomalie von $1,9m$. Die Interpretation der Ergebnisse finden sich im nachfolgenden Kapitel 4.

4 Diskussion

Die Messungen des Gesamtmagnetfeldes waren deutlich auszuwerten. Es waren nur wenige auffällige und unerwartete Werte, die alle logisch erklärt werden konnten. Bei den Messungen des vertikalen Gradienten sind mehr Unregelmäßigkeiten in den Messungen, die keine eindeutigen Erklärungen finden. Eine geschlossene Iso-Linie im contour plot zeigt theoretisch einen Pol an, wovon in vorhandener Anzahl bei der Fluxgate-Messung nicht auszugehen ist. Wahrscheinlicher ist es, dass die Messwerte nahe aneinander liegen und aufgrund von Ungenauigkeiten keine deutlichen Übergänge darstellen. Dass im südlichen Bereich des Waldes, also im oberen Teil der contour map, die Iso-Linien weit auseinander liegen bedeutet, dass hier keine starken Gradienten vorhanden sind, sondern das Magnetfeld relativ gleichmäßig ist. Im Unteren Bereich, wo das Rohr zu lokalisieren ist, sind die Linien eng, was sinngemäß für die Anomalie in diesem Bereich spricht. Der beschriebene Vergleich der beiden Messvarianten ist in Abbildung 7 und Abbildung 5 zu erkennen. Eine Komponente für Ungenauigkeiten sind die Geräte selbst. Das Overhauser Magnetometer misst das Gesamtfeld, das weniger starken Schwankungen ausgesetzt ist und somit weniger sensitiv auf kleine magnetische Anomalien reagiert

als das Fluxgate Magnetometer. Der vertikale Gradient kann auch von vergleichsweise kleinen Anomalien lokal stark beeinflusst sein, was zu stärkeren Schwankungen führt. Ein nicht zu vernachlässigender Punkt sind Messungenauigkeiten durch die Durchführung, dass die Sonden beispielsweise nicht exakt senkrecht gehalten werden und das Messgrid, u.a. aufgrund des ungängigen Geländes, nicht perfekt aufgelegt ist.

Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass die Messung des Magnetfeldes und insbesondere von Anomalien zwar viele Daten generiert, die Interpretation jedoch keineswegs eindeutige Beweise bzw. Einblicke in den Untergrund liefert. Die Messergebnisse lassen jedoch das gesuchte Metallrohr mit hoher Wahrscheinlichkeit lokalisieren. Wie eingangs in Kapitel 2 beschrieben haben remanent magnetisierte Anomalien ein magnetisches Minimum am Nordpol der Anomalie und ein Maximum am Südpol der Anomalie.

Im vorliegenden Fall ist davon auszugehen, dass das Metallrohr während seiner Herstellung remanent magnetisiert wurde. Das Minimum war damals also zum magnetischen Nordpol ausgerichtet. Dies führt dazu, dass die Feldlinien des Erdmagnetfeldes und des Metallrohres nicht parallel verlaufen und die Anomaliekarte kein Maximum im Süden und kein Minimum im Norden aufweist, sondern verdreht das Minimum und Maximum in Ost-West-Richtung liegen. Diese Ergebnisse decken sich mit den eingangs beschriebenen Erwartungen. Anhand dieser Erklärung lässt sich die magnetische Anomalie auf den oben gezeigten contour maps gut erkennen und einordnen. In Abbildung 12 und Abbildung 13 ist der Verlauf des Metallrohrs in diese contour maps als rote Linie eingezeichnet. Die Linien befinden sich in beiden maps an exakt selber Position im Grid. Dadurch wird erkenntlich, dass die Messungen mit dem Overhauser- und mit dem FLuxgate-Magnetometer gut übereinstimmen, da jeweils die Extremwerte im Zentrum durchschnitten werden. Da die Gradienten-Messung vollständig ist und sowohl das Minimum als auch das Maximum zeigt, während aufgrund der fehlenden Messdaten vom Overhauser-Magnetometer nur der Ansatz des Maximums aufgezeichnet ist, kann das Rohr an alle Informationen angepasst ausgerichtet werden. Dies stellt qualitativ gesprochen keine exakte Lokalisierung, aber eine gute Abschätzung dar. Genauere Aussagen könnten beispielsweise mit einer Erweiterung des Untersuchungsfeldes erfolgen.

In Abbildung 12 ist das Maximum des magnetischen Südpols nur im Ansatz zu erkennen, da nicht alle Messungen gemacht werden konnten. Mithilfe der Fluxgate Magnetometermessungen lässt sich allerdings auch hier der Rohrverlauf genauer spezifizieren.

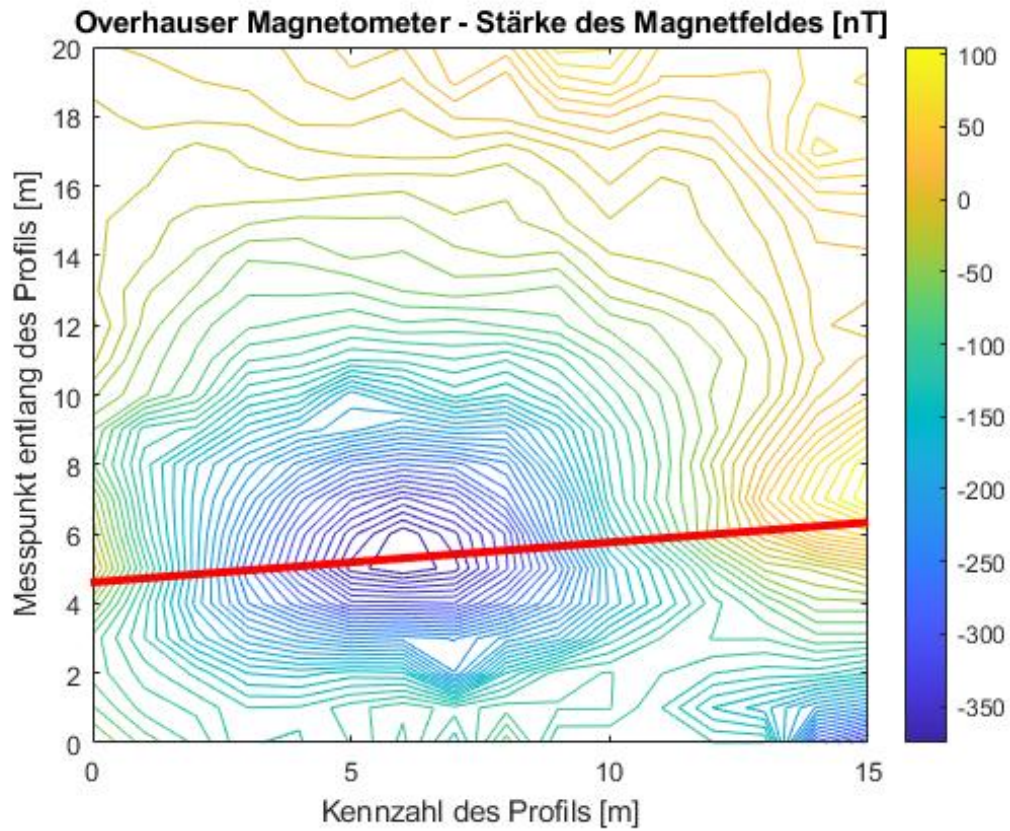


Abbildung 12: Karte des Oberhauser Magnetometers mit eingezeichnetem Rohr

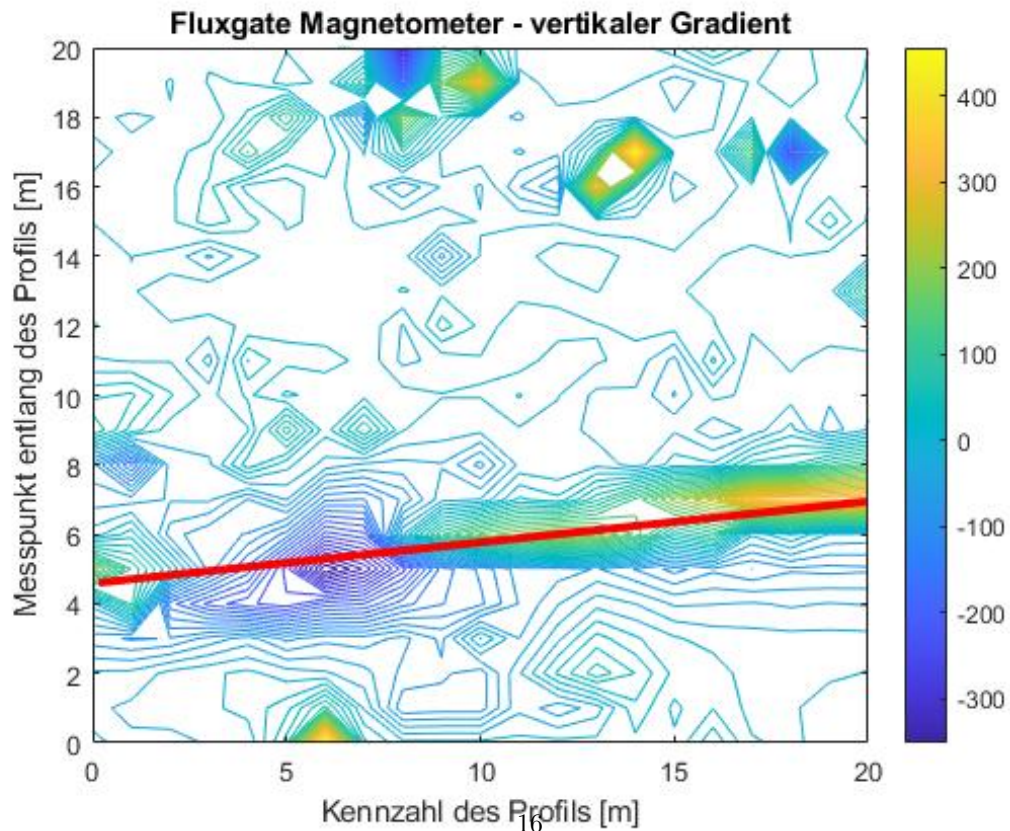


Abbildung 13: Karte des Fluxgate Magnetometers mit eingezeichnetem Rohr

Neben der örtlichen Lokalisierung der Anomalie wird auch die Tiefe des Rohres aus den Messungen abgeschätzt. Die 'Halbbreiten'-Methode liefert für die Messung mit dem Overhauser-Magnetometer mit 7,5 einen höheren Wert als der Durchschnitt aus der Auswertung der Profile mit der Fluxgate-Messung über 1,9 m. Alle drei betrachteten Profile zeigen zumindest näherungsweise eine typische Form, wie sie entsprechend des Forward-Models zu erwarten ist (siehe Abb. 4). So gehen an den Rändern der Extrema die Werte knapp in den Bereich des anderen Vorzeichens. Bei dem Overhauser-Profil ist dies am linken Rand nicht der Fall, was bei Zunahme mehrere Messungen in diese Richtung aber erwartet werden kann. Es wird der Mittelwert genommen, was eine Tiefe von 4,7m entspricht. Wie es auch durch die Streuung der Ergebnisse deutlich wird, ist diese Methode nicht für eine genaue Tiefenbestimmung geeignet. Es stellt eine Abschätzung der Größenordnung dar. Grund ist unter Anderem, dass der Wert stark durch die Inhomogenität des Untergrundes beeinflusst ist. Die in der 'Halbbreiten'-Methode analysierten Profile sollten senkrecht zur Ausrichtung des Rohres genommen werden. Die Pipeline liegt nicht exakt parallel zur x-Achse des Messgrids, dennoch wurden die Profile für die Tiefenbestimmung vereinfachend entlang der y-Richtung genommen. Da die Methode ohnehin nur zur groben Abschätzung dient, wird diese Vereinfachung als ausreichend aussagekräftig für den Zielwert angesehen.

Letztlich zeigt Abbildung 14 die Pipeline im Satellitenbild des Untersuchungsgebietes entsprechend der Ergebnisse. Sie verläuft von Südwesten nach Nordosten. Dass in den Kontur-maps Minimum und Maximum zu sehen sind spricht dafür, dass im Untersuchungsfeld mehrere Rohrstücke der Gasleitung aufzufinden sind. Eine Interpretationsmöglichkeit ist hierbei, dass im Minimum und im Maximum je ein Rohrstück liegt, welche die Magnetisierung unterschiedlich ausgerichtet haben bzw. andersherum im Boden liegen. Denkbar wäre auch, dass die Extrema die Übergänge zwischen zwei Rohrstücken aufzeigen. Beide Messvarianten lassen ein weiteres Maximum links vom Minimum erahnen, was diese Überlegung unterstützt. So würde ein Rohrstück jeweils einen Nord- und Südpol messbar machen. Die Länge eines solchen Rohrstückes würde dann ca. 10 m betragen. Diese Überlegungen beeinflussen nicht die generelle Ausrichtung der Leitung und sind mit deutlich höheren Unsicherheiten zu bewerten.



Abbildung 14: Untersuchungsfeld mit ermittelter Pipeline

5 Zusammenfassung

Nachfolgend werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst. Ziel der Untersuchung war die Lokalisierung der sich im Boden befindenden Gaspipeline. Die Lokalisierung bezieht sich dabei auf die geografische Lage relativ zur Erdoberfläche, die ungefähre Tiefe und die Richtung in welche das Rohr verläuft.

Die Abbildungen 11, 12 und 13 machen das Endergebnis am besten deutlich. Die Gaspipeline befindet sich allen Indikatoren nach an der Grenze zwischen Wald und Schotterweg. Sie verläuft etwa diagonal durch das 20 m x 20 m Messfeld und besteht vermutlich aus mehreren Rohrstücken. Das lässt sich aus den unterschiedlichen Magntfeldanomalien schließen. Die Berechnungen ergeben eine Tiefe des Rohres von ca. 4,7 Metern. Den Anomaliekarten zufolge liegt die Pipeline von Südwesten in Richtung Nordosten.

Trotz dessen, dass die beiden Magnetometer sich weitgehend unterstützende Messergebnisse generieren sind die Ergebnisse nicht fehlerfrei und lassen nur Interpretationen aber keine absolut sicheren Aussagen zu. Die Messgeräte als auch die Messungen selbst sind stets fehlerbehaftet. Unter anderem haben die Untersuchungsbeschaffenheiten, wie die Unebenheiten des angrenzenden Waldstücks, die Metallzäune neben dem Messfeld sowie eventuelle unbekannte magnetische Gegenstände im Untergrund, die Messungen beeinflusst.