

Protokoll zum Versuch

”Magnetics”

Gruppe: ”Gneiss and happy”

Teilnehmer: Anne Bettermann(5672778), Lena Bode (4179872),
Ann-Sophie Denu (5412673), Jens Geier (5669196),
Jana Lebherz (5648474), Maya Prinz (5670873),
Simon Schad (5450613)

Betreuer: Prof. P. Dietrich
Dozent: Prof. Reinhard Drews

durchgeführt am 23. Mai 2022

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 2 |
| 2 | Messmethoden | 3 |
| 2.1 | Overhauser Magnetometer | 3 |
| 2.2 | Fluxgate Magnetometer | 3 |
| 3 | Auswertung | 4 |
| 3.1 | Vertikaler Gradient des Magnetfelds | 4 |
| 3.2 | Totales Magnetfeld | 5 |
| 3.3 | Tiefe der Pipeline | 6 |
| 3.4 | Schwankung des Totalen Feldes am Referenzpunkt | 7 |
| 4 | Diskussion | 8 |
| 5 | Zusammenfassung | 9 |
| | Literatur | 10 |
| | Abbildungsverzeichnis | 10 |
| A | Messwerte | 10 |
| B | MATLAB-Codes | 10 |

1 Einleitung

Die Erde besitzt aufgrund ihres flüssigen, metallisch leitfähigen äußeren Kerns ein permanentes magnetisches Dipolfeld. Para- und ferromagnetische Strukturen im Untergrund verursachen Anomalien, die mithilfe von Magnetometern detektiert werden können. Es kann entweder die gesamte magnetische Flussdichte B ermittelt und als Differenz zu einem Referenzwert dargestellt werden oder es kann direkt der vertikale Gradient gemessen werden.

Ziel des Feldpraktikums war es, mit magnetischen Messmethoden eine Gaspipeline unterhalb der Erdoberfläche zu lokalisieren. Der zu vermessende Bereich, ein Quadrat, nimmt eine Fläche von 20 m x 20 m (Abbildung 1) ein und liegt in der Nähe des Parkhauses Ebenhalde in Tübingen auf dem Campus 'Auf der Morgenstelle'. Die geographischen Koordinaten des Referenzpunkts (vgl. Abbildung 1) sind 48.53754°N , 9.03096°E .

Die Messungen wurden am 23. Mai 2022 zwischen 10:30 und 12:50 Uhr durchgeführt. Der Himmel war bewölkt, die Temperatur lag bei 21°C . Gegen Ende der Arbeiten begann es leicht zu regnen. Am nördlichen Gebietsrand befanden sich Störfaktoren in Form von gelagerten Metallbauteilen und weiteren Baustoffen. Eine weitere Störquelle war durch den permanenten Straßenverkehr gegeben. Mit Ausnahme des asphaltierten Weges ist das Gebiet größtenteils von einem Wald mit dichtem Unterwuchs bedeckt.



Abbildung 1: Satellitenansicht des Messgebiets südlich des Parkhauses Ebenhalde in Tübingen auf dem Campus 'Auf der Morgenstelle'. Koordinaten Referenzpunkt: 48.53754°N , 9.03096°E .

2 Messmethoden

Die Messungen wurden zeilenweise auf einem rechteckigen Raster aus 21×21 Messpunkten im Abstand von 1 m (441 Punkte) durchgeführt. Dazu wurden parallel zwei unterschiedliche Magnetometer verwendet, welche die totale magnetische Flussdichte bzw. den vertikalen Gradienten der magnetischen Flussdichte messen. Da die Stärke des Erdmagnetfelds zeitlich variiert, wurde in regelmäßigen Abständen (nach jeweils 21 Messpunkten) der Betrag des totalen Felds an einem Referenzpunkt aufgezeichnet. Vier Rasterpunkten waren aufgrund vorhandener Hindernisse der Messung nicht zugänglich.

2.1 Overhauser Magnetometer

Mithilfe des Overhauser-Magnetometers wird das Totale Magnetfeld gemessen. Das Instrument enthält eine Probe einer Verbindung mit zahlreichen chemisch identischen Protonen, z.B. Wasser oder langkettige aliphatische Kohlenwasserstoffe (C_nH_{2n+2}). Durch ein äußeres elektromagnetisches Feld werden die Kernspins der Protonen parallel ausgerichtet. Nach Abschalten des elektromagnetischen Felds kippt das Erdmagnetfeld die Kernspins, sodass eine Präzessionsbewegung um die Feldrichtung resultiert. Die Präzessionsfrequenz ist proportional zur magnetischen Flussdichte und kann durch die in einer Spule induzierte Spannung gemessen werden. Die Genauigkeit gängiger Overhauser-Messgeräte beträgt ca. 1 nT. Das Gerät ist typischerweise auf einen etwa 2 m langen Stab montiert, welcher senkrecht gehalten werden muss, was Messungen in dicht bewachsenem Gelände erschwert.

2.2 Fluxgate Magnetometer

Im Gegensatz zum Overhauser-Magnetometer wird beim Fluxgate-Magnetometer, auch Förstersonde genannt, der vertikale Gradient des Magnetfelds gemessen. Zwei weichmagnetische Spulenkern werden periodisch durch eine Wechselspannung in entgegengesetzter Orientierung magnetisiert, wobei die in den Spulen induzierten Spannungen sich gegenseitig aufheben. In Gegenwart eines externen Felds resultiert eine Nettospannung, da die Orientierung zu den beiden Spulenkernen unterschiedlich ist. Diese Spannung ist proportional zum Gradienten.

3 Auswertung

3.1 Vertikaler Gradient des Magnetfelds

Abbildung 2 und 3 zeigen das Ergebnis der Messung des vertikalen Gradienten der magnetischen Flussdichte in Form eines Konturliniendiagramms bzw. einer 3D-Darstellung. Offensichtliche Ausreißer in den Messwerten, welche vermutlich von den in der Einleitung beschriebenen Störobjekten herrühren, wurden aus den Daten entfernt. Die horizontale Seite des rechteckigen Messbereichs streicht etwa in ONO-Richtung (65°). Man erkennt klar eine lineare Struktur in der unteren Hälfte des Bereichs, welche den Verlauf der Pipeline abbildet. Die Anzahl der Extrema des Gradienten muss allerdings nicht zwingend der Anzahl der Extrema in der magnetischen Flussdichte selbst entsprechen.

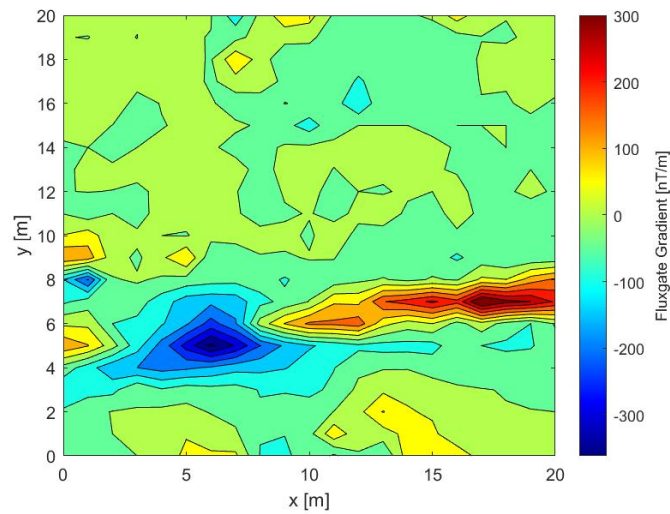


Abbildung 2: Konturliniendiagramm der Gradientenmessung.

Abbildung 3 bildet das Ergebnis der Messung des vertikalen Gradienten in einer alternativen dreidimensionalen Darstellung ab. Diese verdeutlicht die Erkenntnisse, die aus dem Konturliniendiagramm gezogen werden können.

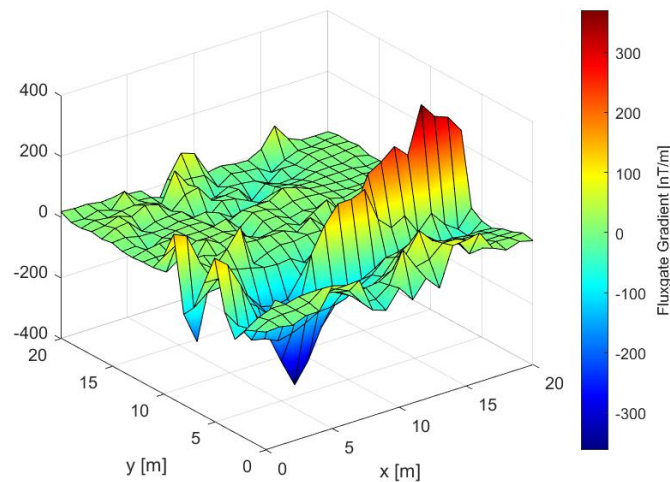


Abbildung 3: 3D-Diagramm der Gradientenmessung.

3.2 Totales Magnetfeld

In Abbildung 4 und 5 ist die Differenz aus der magnetischen Flussdichte im Messbereich und ihrem Wert am Referenzpunkt graphisch dargestellt (magnetische Anomalie). Man erkennt denselben Verlauf wie in der Gradientenmessung, allerdings ist die Struktur deutlich breiter und es sind entlang der Pipeline nur zwei Extrema vorhanden. Auffällig ist, dass das Vorzeichen der Anomalie nicht dem entspricht, was für eine paramagnetische Pipeline im Erdmagnetfeld auf der nördlichen Hemisphäre erwartet wird: da die Feldlinien des Erdmagnetfelds in Richtung Nordpol einfallen (Inklination in Tübingen: $64^\circ 29'$) erwartet man im nördlichen Bereich der Pipeline eine positive, im südlichen Bereich eine negative Anomalie. Tatsächlich ist die Anomalie der etwa in ONO-Richtung streichenden Pipeline annähernd spiegelsymmetrisch zu ihrer Längsachse, während im westlichen Teil der Pipeline eine negative, im östlichen Teil eine positive Anomalie vorhanden ist. Dies lässt sich nicht durch ein vom Erdmagnetfeld induziertes Magnetfeld in der Pipeline erklären, vielmehr muss eine remanente Magnetisierung der Pipeline - welche aus ferromagnetischem Material besteht - angenommen werden.

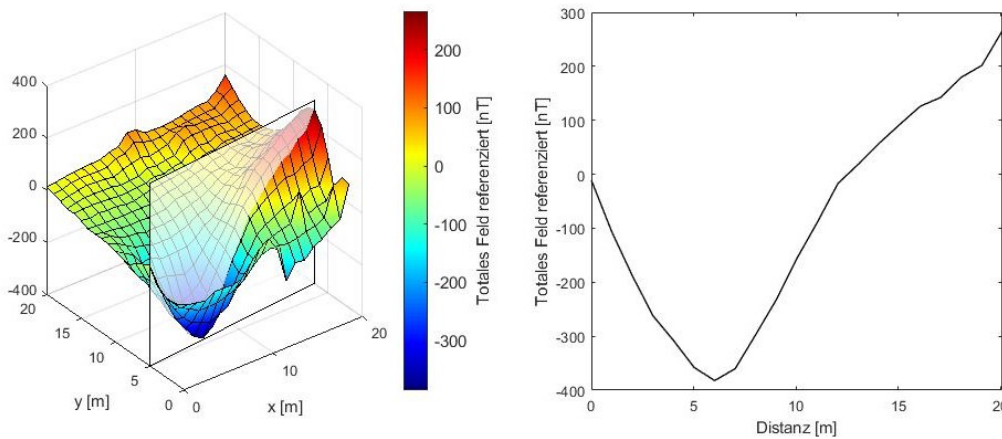


Abbildung 4: Anomalie der magnetischen Flussdichte. Oberflächendiagramm links. Profilschnitt durch Extrema rechts.

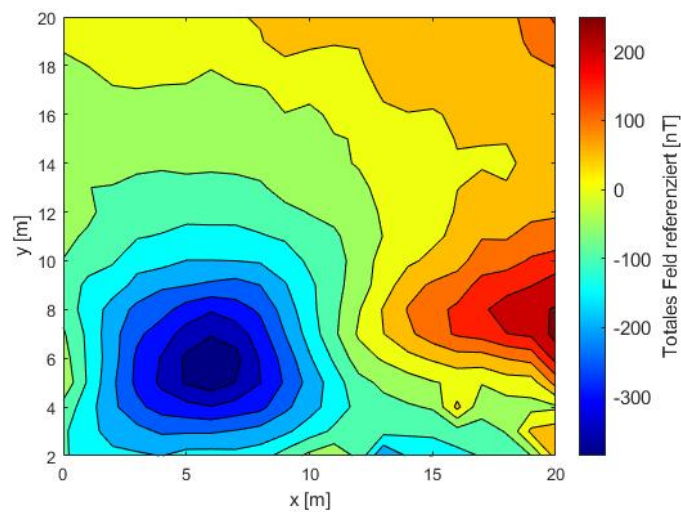


Abbildung 5: Anomalie der magnetischen Flussdichte (Konturliniendiagramm).

3.3 Tiefe der Pipeline

Um die Tiefe der Pipeline berechnen zu können, ist das 'forward-model' *MagneticPrismApplet.ipynb* hilfreich (Abbildung 6). Das Programm modelliert die entsprechende magnetische Anomalie für ein Prisma im Untergrund. Das Prisma wurde im Modelldurchlauf der Pipeline angenähert und das Erdmagnetfeld der geografischen Lage von Tübingen angepasst. Die Tiefe des Prisma wurde von 2-5 m variiert, da die Pipeline in dieser Tiefe vermutet wird. Dabei wurde jeweils die Halbwertsbreite bestimmt um anschließend einen gemittelten Umrechnungsfaktor von der Halbwertsbreite auf die ungefähre Tiefe zu bestimmen:

$$T = HW \cdot 0,6 \quad (1)$$

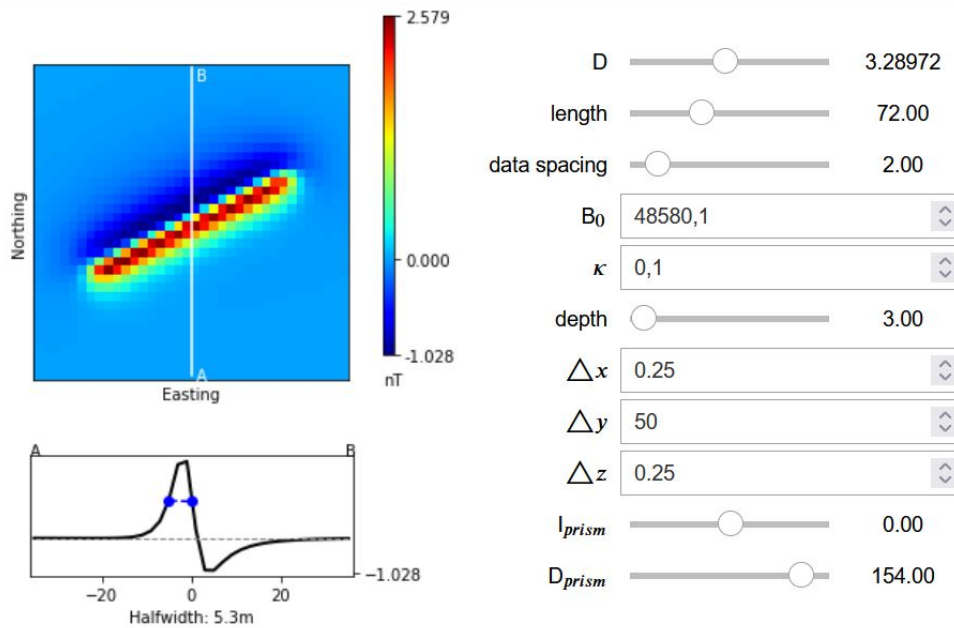


Abbildung 6: Forward-model mit einem der Pipeline entsprechenden Prisma.

Die ortsbezogenen Daten auf der rechten Seite von Abbildung 6 stammen von der National Oceanic Atmospheric Administration des U.S. Department of Commerce (<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfwmm>) und wurden am Messtag, dem 23.05.22 für Tübingen bestimmt.

Die resultierende Tiefe der Pipeline wird mithilfe von (1) bestimmt und liegt im Profil für $x = 6$ m mit einer Halbwertsbreite von 5,24 m in einer Tiefe von 3,14 m und im Profil für $x = 20$ m mit einer Halbwertsbreite von 4,75 m in einer Tiefe von 2,8 m. Es ist festzustellen, dass die Pipeline in Richtung WSW eine leicht positive Steigung hat (Abbildung 7).

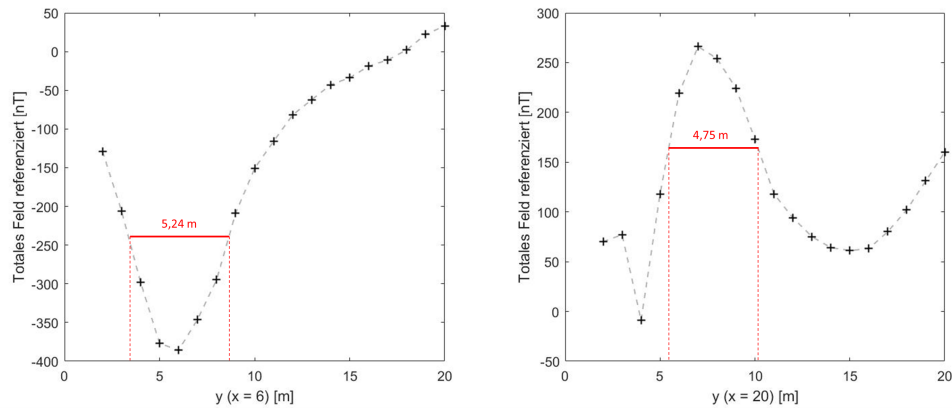


Abbildung 7: Halbwertsbreiten der Profilschnitte durch Extrema der magnetischen Flussdichte. Minimum ($x = 6$ m) links. Maximum ($x = 20$ m) rechts.

3.4 Schwankung des Totalen Feldes am Referenzpunkt

Die in Abbildung 8 abgebildete Kurve zeigt natürliche Schwankungen des Erdmagnetfeldes über die Zeit. Da diese im Bereich einer Größenordnung höher schwanken als die Genauigkeit des Messgerätes ist ein Korrekturfaktor durch den Mittelwert zu empfehlen, welcher bereits unter Punkt 3.2 zur Diagrammerstellung verwendet wurde.

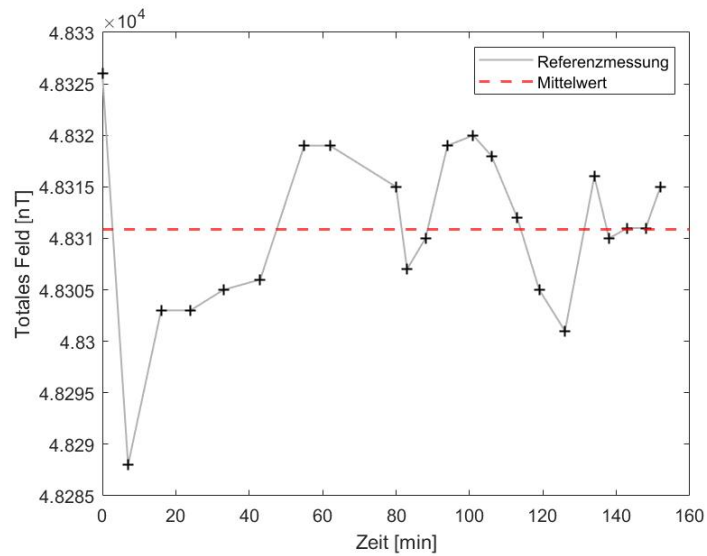
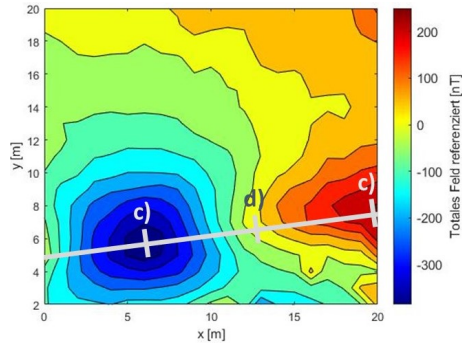


Abbildung 8: Referenzmessungen des Totalen Feldes zwischen 10:17 Uhr und 12:39 Uhr.

4 Diskussion

Abbildung 9a zeigt den Verlauf der Pipeline entlang der Extrema der totalen magnetischen Flussdichte. Abbildung 9b zeigt dazu die nach ONO verlaufende Pipeline im Satellitenbild des Messgebietes. Der in Richtung ONO beobachtete Vorzeichenwechsel der magnetischen Anomalie lässt sich durch die Annahme von mindestens zwei unterschiedlich orientierten remanenten Magnetfeldern in der Pipeline erklären. Es wird daher angenommen, dass die Pipeline aus Segmenten zusammengesetzt wurde, die bei ihrer Herstellung remanent magnetisiert wurden und deren Felder im montierten Rohr verschiedene Orientierungen besitzen. Da die Orientierung der Magnetfelder zur Längsachse der Segmente nicht bekannt ist, kann keine Aussage über die Abmessungen und Verbindungspunkte der einzelnen Segmente getroffen werden. Abbildung 9c und Abbildung 9d zeigen zwei unterschiedliche Theorien, die die Verbindungsstellen unterschiedlich platzieren würden, wie es in Abb. 9a mit den Symbolen c) und d) eingezeichnet ist.

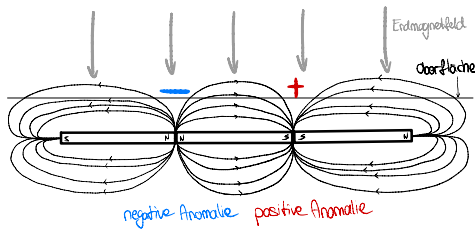
Sind die Segmente parallel zu ihrer Längsachse remanent magnetisiert und so verlegt, dass sie in der Pipeline mit gleichen Polen aufeinandertreffen, wären die Verbindungsstellen der Segmente an den Positionen der Extrema der magnetischen Anomalie (Abbildung 9c). Sind die Segmente jedoch willkürlich in ihrer Richtung, aber untereinander gleich magnetisiert, so entsteht die vorliegende magnetische Anomalie durch entgegengesetztes Verbinden der Rohre mit einem Verknüpfungspunkt zwischen den Extrema der magnetischen Flussdichte (Abbildung 9d).



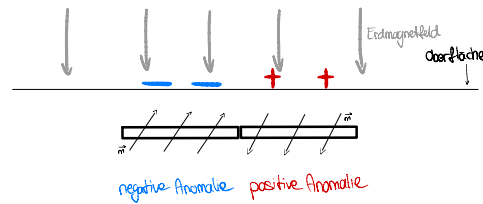
(a) Lage der Pipeline im Konturliniendiagramm der totalen magnetischen Flussdichte.



(b) Lage der Pipeline im Messgebiet.



(c) Theorie mit drei Pipeline-Segmenten.



(d) Theorie mit zwei Pipeline-Segmenten.

Abbildung 9: Lage der Pipeline und Visualisierung der Theorien der Pipeline-Segmente.

5 Zusammenfassung

Die Messung des vertikalen Gradienten der magnetischen Flussdichte über ein quadratisches Raster im 1 x 1 m Abstand ermöglichte problemlos die Ermittlung der Streichrichtung einer unterirdischen Gaspipeline, das sich direkt in der graphischen Darstellung der Messwerte als lineare Struktur abzeichnete. Eine parallel durchgeführte Messung der totalen magnetischen Flussdichte führte zum selben Ergebnis, allerdings mit verminderter Ortsgenauigkeit aufgrund der größeren Signalbreite. Aus dem räumlichen Verlauf des Vorzeichens der totalen Flussdichte folgt zwingend, dass die Pipeline eine remanente Magnetisierung, die nicht die Form eines einfachen Dipolfelds besitzt, aufweist. Vermutlich wurde die Pipeline aus mindestens zwei Segmenten zusammengesetzt, deren remanente Magnetfelder nicht in derselben Orientierung aufeinandertreffen. Da die räumliche Form der Remanentmagnetfelder dieser Segmente nicht bekannt ist, konnten ihre Anzahl bzw. ihre Abmessungen nicht bestimmt werden. Die Tiefe der Pipeline wurde mit Hilfe einer Forward-Modellierung über die Halbwertsbreite der Extrema der magnetischen Flussdichte ermittelt.

In summa konnten also die Streichrichtung und die Verlegungstiefe der Pipeline bestimmt werden. Weiterhin folgt aus den Messungen, dass die Pipeline im Untersuchungsgebiet aus Segmenten zusammengesetzt wurde. Für diese Ergebnisse war die Kombination beider Messinstrumente notwendig. Verglichen mit dem Protonenpräzessions-Magnetometer erwies sich das Fluxgate-Magnetometer als einfacher in der Anwendung, da keine Referenzwerte aufgenommen werden mussten und der kompaktere Aufbau des Geräts in dicht bewachsenem Gelände von Vorteil war.

Literatur

- [1] Drews, R., Geophysics 03_Mag_01, 04_Mag_02 [Vorlesungsfolien] (2022), Eberhard Karls Universität Tübingen
- [2] NOAA National Centers for Environmental Information (NCEI): Magnetic Field Calculators (o. J.), <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfwmm> (23.05.22)
- [3] Oldenburg, D., Jones, F., Heagy, L., Cockett, R., Astic, T., Devriese, S., Kang, S., Capriotti, J., Geophysics for Practicing Geoscientists: GPG Labs: MagneticPrismApplet.ipynb (2017), <https://gpg.geosci.xyz/> (02.06.22)

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---|---|---|
| 1 | Satellitenansicht des Messgebiets südlich des Parkhauses Ebenhalde in Tübingen auf dem Campus 'Auf der Morgenstelle'. Koordinaten Referenzpunkt: 48.53754°N, 9.03096°E. | 2 |
| 2 | Konturliniendiagramm der Gradientenmessung. | 4 |
| 3 | 3D-Diagramm der Gradientenmessung. | 4 |
| 4 | Anomalie der magnetischen Flussdichte. Oberflächendiagramm links. Profilschnitt durch Extrema rechts. | 5 |
| 5 | Anomalie der magnetischen Flussdichte (Konturliniendiagramm). | 5 |
| 6 | Forward-model mit einem der Pipeline entsprechenden Prisma. | 6 |
| 7 | Halbwertsbreiten der Profilschnitte durch Extrema der magnetischen Flussdichte. Minimum (x = 6 m) links. Maximum (x = 20 m) rechts. | 7 |
| 8 | Referenzmessungen des Totalen Felds zwischen 10:17 Uhr und 12:39 Uhr. | 7 |
| 9 | Lage der Pipeline und Visualisierung der Theorien der Pipeline-Segmente. | 8 |

A Messwerte

- 1. Measurements_complete.xlsx
- 2. Total_field_overhauser_measurements_referenced.xlsx
- 3. Vertical_gradient_fluxgate_measurements.xlsx
- 4. Reference_point_over_time.xlsx

B MATLAB-Codes

- 1. Total_field_overhauser_referenced.m
- 2. Vertical_gradient_fluxgate.m
- 3. Reference_point_over_time.m