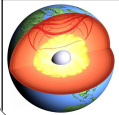


Einführung in die Geophysik I

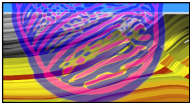
Magnetik

Thomas Bohlen, Geophysikalisches Institut, Fakultät für Physik

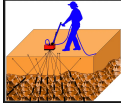
Seismologie



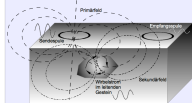
Seismik



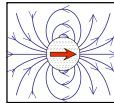
Georadar



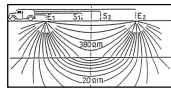
Elektromagnetik



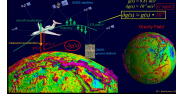
Magnetik



Geoelektrik



Gravimetrie



Inhalte der Vorlesung

Einführung in die Geophysik I, WS 2023/24, Kl. HS B

#	Datum	Vorlesung (09:45-11:15h)	Übungen (11:30-12:30h)
1	25.10.23	Einführung, Wellenausbreitung	
	01.11.23	Feiertag	
2	08.11.23	Wellenausbreitung	
3	15.11.23	Refraktionsseismik	Ü1: Moduln
	22.11.23	Studieninformationstag, Keine Vorlesung	
4	29.11.23	Reflexionsseismik I	
	06.12.23	Reflexionsseismik II	Ü2: Refraktionsseismik
5	13.12.23	Elektromagnetische Felder	Ü3: Reflexionsseismik
6	20.12.23	Goradar	
7	10.01.24	Goelektrik	Ü4: Georadar
8	17.01.24	Gravimetrie	Ü5: Goelektrik
9	24.01.24	Gravimetrie	
10	31.01.24	Magnetik	Ü6: Gravimetrie
11	07.02.24	Magnetik	Ü7: Magnetik
	14.02.24	Klausur	

Vorlesungsinhalte bisher

Fokus: Das globale Magnetfeld der Erde

- Beschreibung
- Zeitliche Veränderungen
- Entstehung

Vorlesungsinhalte heute

Fokus: Das lokale Magnetfeld (Magnetik)

- Magnetisierung von Gesteinen: remanent und induziert
- 2 typische magnetische Messinstrumente
- Grundsätzliche Form magnetischer Anomalien an der Erdoberfläche (Prospektion)
- 2 Beispiele aus der oberflächennahen Erkundung

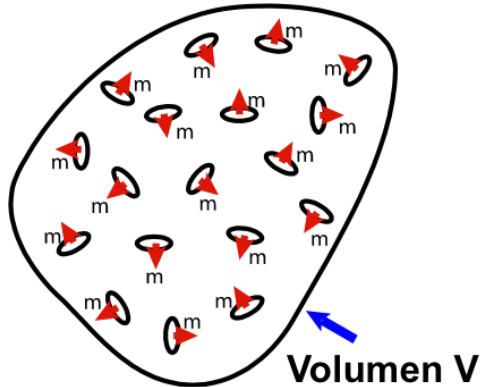
Agenda

- Magnetisierung von Gesteinen
- Messgeräte
- Form magnetischer Anomalien
- Beispiele aus der oberflächennahen Magnetik
- Zusammenfassung
- Referenzen

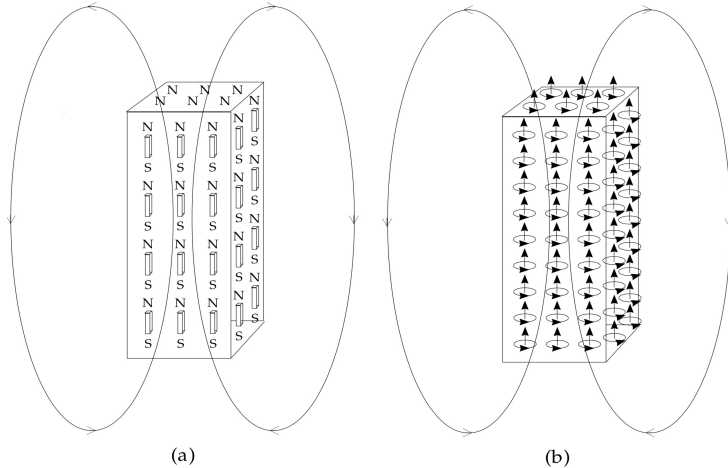
Magnetisierung

- Die Rotation von Elektronen um den Atomkern erzeugt einen Spin, der ein magnetisches Moment verursacht.
- Die vektorielle Summe der atomaren magnetischen Momente dividiert durch das Volumen ergibt die Magnetisierung einer Körpers:

$$\vec{M} = \sum \vec{m}_i / V$$



Magnetisierung



Magnetisierung

Es wird zwischen 2 Arten der Magnetisierung unterschieden:

① Remanente Magnetisierung

- Bereits im Gestein vorhanden (a priori)
- Verursachende Prozesse: (a) Abkühlung (Thermoremanenz), (b) Sedimentation (Sedimentationsremanenz), (c) chemische Prozesse

② Induzierte Magnetisierung

- Die Monopole sind in ihrer Orientierung beweglich und richten sich nach dem äußeren Feld aus. Ein Maß für die Verstärkung ist die magnetische Suszeptibilität.

Induzierte Magnetisierung

- Diese induzierte Magnetisierung $\vec{M}$ weist in Richtung des magnetisierenden Erregungsfelds $\vec{H}$ und ist diesem proportional:

$$\vec{M} = \kappa \vec{H}$$

- Hierbei ist die Suszeptibilität κ ein Maß für die Magnetisierbarkeit eines Materials.
- κ ist dimensionslos.
- Betrachtet man das Magnetfeld $\vec{B}$ in einen Probekörper in einem äußeren magnetischen Erregungsfeld $\vec{H}$, so ergibt sich dieses als Summe aus Beiträgen des äußeren Erregungsfelds $\vec{H}$ und des von diesem in der Materie induzierten Magnetfelds:

$$\vec{B} = \mu_0 \left(\vec{H} + \vec{M} \right) = \mu_0 (1 + \kappa) \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

Induzierte Magnetisierung

- Dabei wird $\mu_r = 1 + \kappa$ als relative magnetische Permeabilität bezeichnet. Sie ist ein Maß für die magnetische Durchdringbarkeit oder für die Größe der abstoßenden oder anziehenden Kräfte innerhalb eines Körpers, der selbst magnetisch ist.
- Die Linearität von $\vec{B}$ und $\vec{H}$ ist eine Näherung. Sie gilt nicht für ferromagnetische Stoffe.

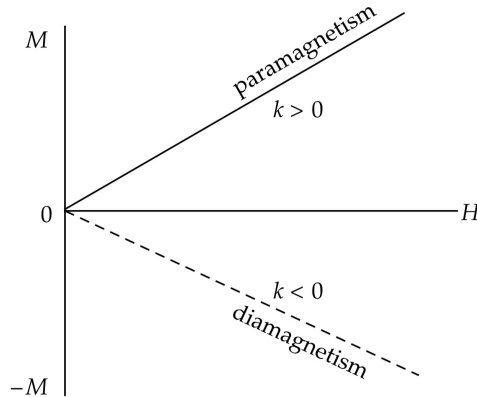
Diamagnetismus

- Alle Stoffe zeigen Diamagnetismus.
- Die auf ihren Bahnen kreisenden Elektronen entwickeln ein magnetisches Moment.
- Nach der Lenzschen Regel ist das von diesem induzierte magnetische Moment dem magnetischen Erregungsfeld $\vec{H}$ entgegengesetzt.
- Magnetisierung gering und $\kappa < 0$.
- Typischer Wert $\kappa \approx -10^{-5}$

Paramagnetismus

- Die statistische Gleichverteilung der magnetischen Momente wird in Richtung des äußeren Erregungsfelds $\vec{H}$ verschoben: Die induzierte Magnetisierung $\vec{M}$ ist proportional zur Stärke des Erregungsfelds $\vec{H}$ und parallel zu dessen Orientierung.
- Die resultierende Suszeptibilität ist positiv ($\kappa > 0$) und reversibel.
- Typischer Wert $\kappa \approx 10^{-5}$ bis 10^{-4}

Para- und Diamagnetismus



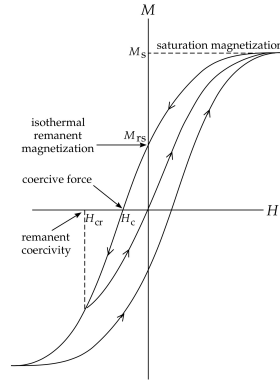
Die Magnetisierung bei Para- und Diamagnetismus.

Ferromagnetismus

- Der Mechanismus ist grundsätzlich verschieden von Para- und Diamagnetismus.
- FM ist ein im Stoff innewohnender permanenter Magnetismus.
- Im manchen Stoffen besteht eine starke Wechselwirkung zwischen Ionen. Es findet auch ein Austausch von Elektronen statt. Dies erzeugt eine Gleichrichtung magnetischer Momente (spontane Magnetisierung) in "weissen Bezirke" mit einer räumlichen Ausdehnung von etwa $1\mu m$.
- Die Magnetisierungsrichtung der Bezirke ist statistisch verteilt. Daher besitzt der Körper makroskopisch oft kein resultierendes Moment.
- Ein äußeres Erregerfeld kann die weissen Bezirke jedoch ausrichten und eine starke makroskopische Magnetisierung induzieren und einfrieren.

Ferromagnetismus

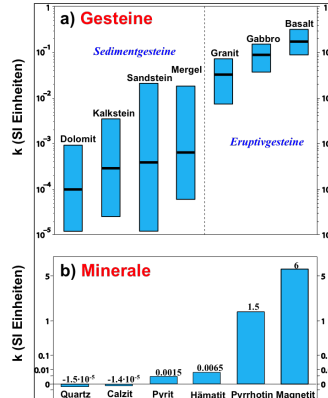
- Die Magnetisierung ferromagnetischer Stoffe zeigt eine Hysteresis-Schleife.
- Bei der Sättigungs-Magnetisierung M_s sind alle weissen Bezirke parallel zum Erregerfeld $\vec{H}$ orientiert
- Bei der Zurückführung des äußeren Feldes verbleibt eine remanente Magnetisierung M_{rs} : die weissen Bezirke bleiben teilweise ausgerichtet.
- Im linearen Bereich gilt die Gleichung $\vec{M} = \kappa \vec{H}$. Die Suszeptibilität ist relativ hoch und liegt im Bereich $\kappa \approx 10^{-2}$ bis 5



Magnetisierung ferromagnetischer Materialien (Quelle: Lowrie, 2007)

Magnetische Suszeptibilität

- Wichtige ferromagnetische Minerale in Gesteinen sind Hämatit und Magnetit.
- Geringe Mengen an Hämatit und Magnetit kann die effektive Suszeptibilität eines Gesteins signifikant erhöhen.



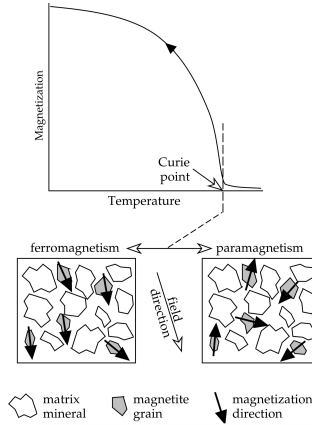
Magnetische Suszeptibilität verschiedener Gesteine und Minerale

Thermoremanente Magnetisierung

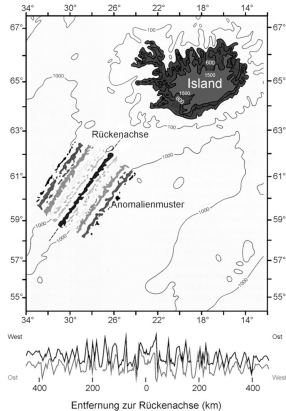
- Ein wichtiger Mechanismus zur Erzeugung einer remanenten Magnetisierung in Gesteinen ist die thermoremanente Magnetisierung.
- Bei der Abkühlung eines ferromagnetischen Minerals wechselt bei der sog. Curie-Temperatur die Magnetisierung vom Paramagnetismus zum Ferromagnetismus, d.h. unterhalb der Curie-Temperatur bilden sich die weissen Bezirke und die induzierte Magnetisierung steigt stark an.
- Dabei entsteht auch eine remanente Magnetisierung, d.h. die magnetischen Momente verbleiben im statistischen Mittel parallel zum äußeren Feld.
- Dieser Effekt wird in der Paläomagnetik ausgenutzt, um die Orientierung des Erdmagnetfeldes in der Vergangenheit zu rekonstruieren. Wenn man das ungefähre Alter der Gesteine kennt, lassen sich dann auch plattentektonische Bewegungen nachvollziehen.

Thermoremanente Magnetisierung

- Bei der Abkühlung und dem Durchschreiten der Curie-Temperatur wechselt Magnetit vom Para- zum Ferromagnetismus.
- Bei weiterer Abkühlung wird die Magnetisierung eingefroren und die magnetischen Momente richten sich im statistischen Mittel parallel zum äußeren Feld aus.
- Die resultierende thermoremanente Magnetisierung spiegelt daher die Richtung des äußeren Feldes zum Zeitpunkt der Abkühlung wieder.
- Eine markantes Beispiel sind die magnetischen Streifenmuster an den mittelozeanischen Rücken.



Magnetische Streifenmuster an den MOR



- Bei der Abkühlung der Gesteine aus größerer Tiefe wird das vorherrschende Magnetfeld eingefroren
- Es entstehen symmetrische Muster der remanenten Magnetisierung der ozeanischen Basalte

(Clauser 2016)

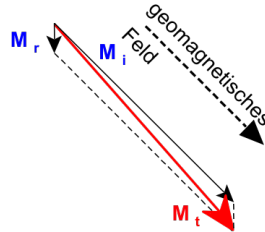
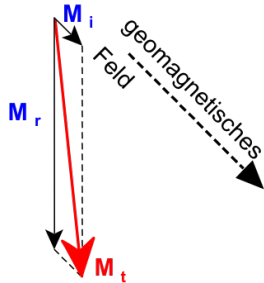
Induzierte und remanente Magnetisierung

Das sog. Königsberger Verhältnis quantifiziert das Verhältnis von remanenter Magnetisierung $\vec{M}_r$ zu induzierter Magnetisierung $\vec{M}_i = \kappa \vec{H}$:

$$Q = \frac{|\vec{M}_r|}{|\kappa \vec{H}|} = \frac{|\vec{M}_r|}{|\vec{M}_i|}$$

$Q \gg 1$: Paläomagnetismus

$Q \ll 1$: Magnetische Prospektion



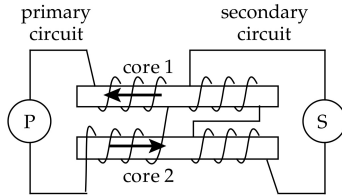
Agenda

- Magnetisierung von Gesteinen
- Messgeräte
- Form magnetischer Anomalien
- Beispiele aus der oberflächennahen Magnetik
- Zusammenfassung
- Referenzen

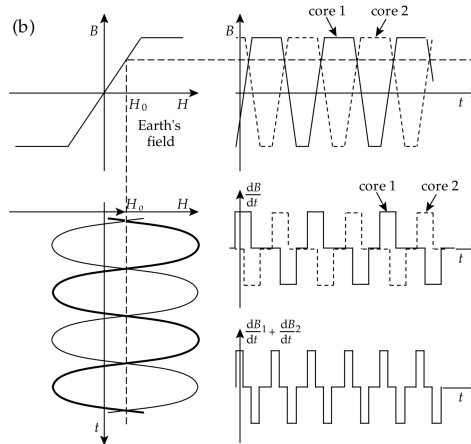
Das Saturationskern-Magnetometer

- Engl. Fluxgate-Magnetometer, wird auch Förster-Sonde genannt.
- Zwei weichmagnetische Kerne mit sehr hoher Suszeptibilität werden periodisch entgegengesetzt durch einen primären Strom in die Sättigung getrieben.
- Die Kerne sind außerdem von zwei gegensinnigen Empfängerspulen (sekundärer Stromkreis) umwickelt.
- Bei Abwesenheit eines Feldes fließt in dem sekundären Stromkreis kein Strom, da sich die magnetischen Flüsse in den Kernen genau aufheben.
- Liegt nun ein äußeres Magnetfeld an, so erzeugt die vektorielle Komponente in Richtung der Kerne ein schnellere Sättigung des einen Kerns. Es kommt zu einer geringen Zeitverschiebung (Phasenverschiebung) bei der Sättigung der beiden Kerne. Diese Phasenverschiebung wird detektiert und dient zur Bestimmung der Stärke des äußeren Feldes.
- Das Saturationskern-Magnetometer misst die vekterielle Komponente des äußeren Feldes parallel zur Achse der beiden Kerne.
- Es sollte vor der Messung daher in Richtung des äußeren Magnetfeldes gedreht werden.
- Die Genauigkeit beträgt etwa $\pm 1 nT$

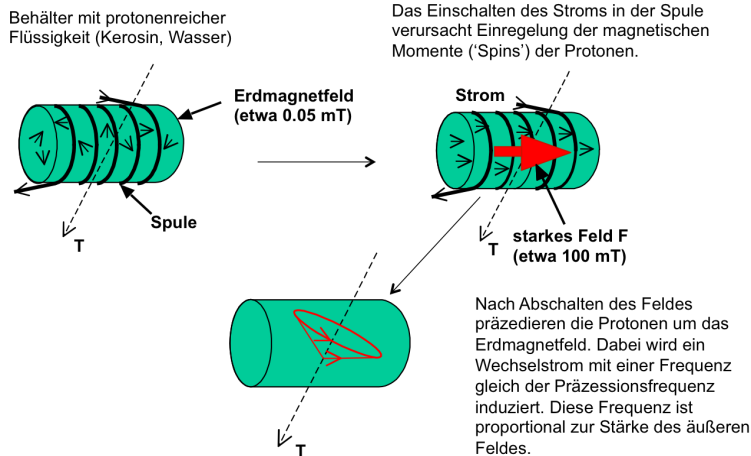
Das Saturationskern-Magnetometer



Funktionsprinzip eines Saturationskern-Magnetometers. Bei einem äußerem Feld tritt eine Phasenverschiebung im entgegengesetzten Fluss B in den beiden Spulen auf.



Das Präzessionsmagnetometer



Das Präzessionsmagnetometer

- Die Totalintensität T (in nT) ist proportional zur Präzessionsfrequenz f (in Hz):
 $T = 23.5f$.
- Es wird die Intensität des Totfeldes T gemessen (keine vektorielle Komponente).
- Die Genauigkeit beträgt etwa $\pm(0.1 - 1\text{ nT})$. Die Messzeit beträgt 1-5 s.

Agenda

- Magnetisierung von Gesteinen
- Messgeräte
- **Form magnetischer Anomalien**
- Beispiele aus der oberflächennahen Magnetik
- Zusammenfassung
- Referenzen

Form magnetischer Anomalien

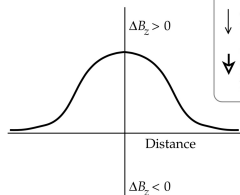
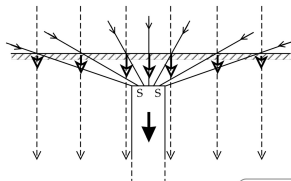
- Eine magnetische Anomalie ist die Differenz zwischen dem äußeren Erdmagnetfeld $\vec{B}_0$ und einem sekundären Feld $\vec{B}_s$:

$$\Delta \vec{B} = \vec{B}_0 - \vec{B}_s$$

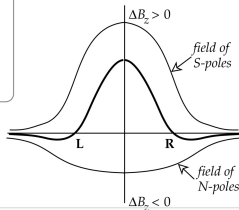
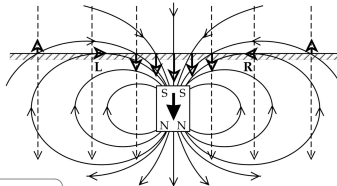
- Das sekundäre Feld $\vec{B}_s$ kann durch eine induzierte oder remanente Magnetisierung im Erdinneren erzeugt werden.
- Im Folgenden betrachten wir den Fall der induzierte Magnetisierung (Prospektion).
- Die Anomalie $\Delta \vec{B}$ hängt in Betrag und Richtung u.a. von folgenden Faktoren ab:
 - Betrag und Richtung des äußeren Feldes $\vec{B}_0$
 - Form und Lage des magnetisierten Störpers (Erzeugung von $\vec{B}_s$)
 - Entfernung des Messpunktes von der Anomalie (Überlagerung der Felder).
- Im Allgemeinen führt man eine Anpassung der Beobachtung durch Modellrechnungen durch, bei denen die o.g. Faktoren systematisch angepasst werden.
- Wie bei vielen geophysikalischen Anpassungen sind diese oft nicht eindeutig.

Magnetische Anomalie bei einem endlich tiefen vertikalen Dike

(a) infinite depth extent:
monopole model



(b) finite depth extent:
dipole model

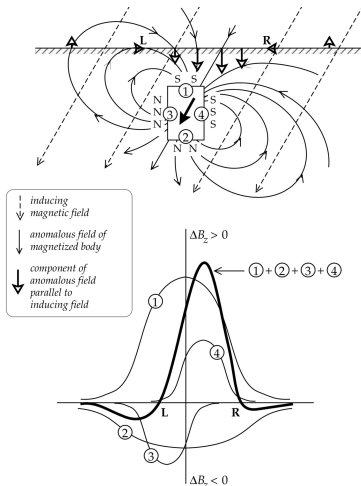


$\downarrow$ inducing magnetic field
 $\downarrow$ anomalous field of magnetized body
 $\downarrow$ component of anomalous field parallel to inducing field

Durch die Überlagerung der Felder entstehen an beiden Seiten negative Anomalien neben der zentralen positiven Anomalie

(Lowrie 2007)

Magnetische Anomalie bei einem endlich tiefen vertikalen Dike



- Bei schrägem Einfall des äußeren Feldes und entsprechender Magnetisierung verstärkt sich das lokale Minimum in Richtung der Horizontalkomponente des äußeren Feldes (Norden).
- Das Maximum verschiebt sich in die entgegengesetzte Richtung (Süden).

(Lowrie 2007)

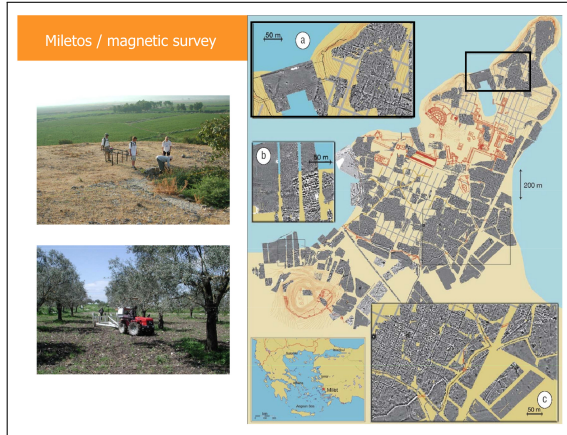
Agenda

- Magnetisierung von Gesteinen
- Messgeräte
- Form magnetischer Anomalien
- Beispiele aus der oberflächennahen Magnetik
- Zusammenfassung
- Referenzen

Archäologische Prospektion

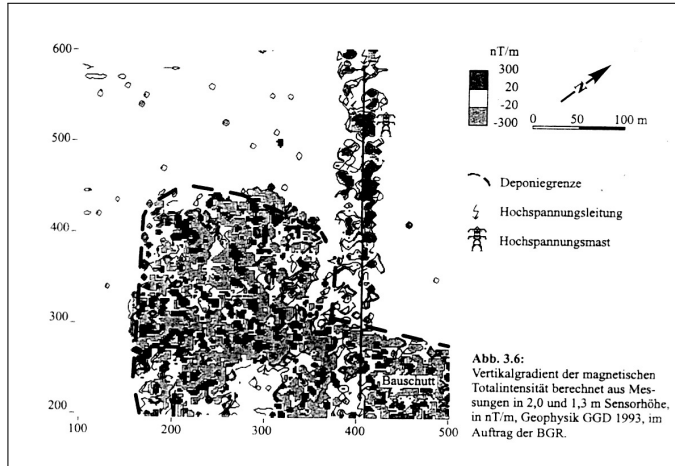
- Bei der archäologischen Prospektion werden häufig Gradiometer verwendet: 2 Magnetometer messen das Magnetfeld in einem geringen vertikalen Abstand (ca. 0.5m bis 2m). Gemessen wird also das Abklingen des Feldes ($\text{Dipol} \propto \frac{1}{r^3}$). Dies erhöht die räumliche Auflösung oberflächennaher Strukturen.
- Oberboden enthält oft mehr Eisenminerale als tiefer Boden und hat daher eine höhere magnetische Suszeptibilität. Bei einer Verfüllung und/oder Absenkung äußert sich dieser als magnetische Anomalie (aus größerer Tiefe).
- Weiterhin können Metallkörper und Mauerwerke eine erhöhte Magnetisierung aufweisen.

Archäologische Prospektion - Milet



(Quelle: W. Rabbel, U Kiel, 2010)

Deponieerkundung



Agenda

- Magnetisierung von Gesteinen
- Messgeräte
- Form magnetischer Anomalien
- Beispiele aus der oberflächennahen Magnetik
- Zusammenfassung
- Referenzen

Zusammenfassung

- Die magnetische Suszeptibilität ist ein Maß für die induzierte Magnetisierung. Diese kann als Para-, Dia- und Ferromagnetismus auftreten.
- Geringe Mengen der ferromagnetischen Minerale Hämatit und Magnetit können die Magnetisierbarkeit deutlich erhöhen
- Die thermoremanente Magnetsierung erzeugt eine remanente Magnetisierung. Diese ist z.B. bedeutsam in der Paläomagnetik.
- Das Saturationskern-Magnetometer misst die Phasenverschiebung bei der Sättigungsmagnetisierung von zwei zueinander entgegengesetzt gewickelten Kernen. So kann die vektorielle Komponente des äußeren Magnetfeldes parallel zur Orientierung der Kerne gemessen werden.
- Das Präzessionsmagnetometer misst die Präzessionsfrequenz von Protonen in einem äußeren Magnetfeld. Diese ist proportional zum Betrag des äußeren Feldes.

Zusammenfassung

- Die Form magnetischer Anomalien hängt ab von der Richtung des äußeren Feldes, der Orientierung der Magnetisierung im Erdinneren sowie der Form von Störkörpern.
- In der oberflächennahen Erkundung können mit Gradiometern sehr kleinräumige Strukturen in hoher Auflösung detektiert werden.

Vielen Dank!

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit und viel Erfolg bei der Klausur !

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

✉ Thomas.Bohlen@kit.edu

🔗 <http://www.gpi.kit.edu/>

Veröffentlicht unter  Lizenz.

Agenda

- Magnetisierung von Gesteinen
- Messgeräte
- Form magnetischer Anomalien
- Beispiele aus der oberflächennahen Magnetik
- Zusammenfassung
- Referenzen

Referenzen

Clauser, C. (2016), *Einführung in die Geophysik : globale physikalische Felder und Prozesse in der Erde*, 2., aktualisierte und korrigierte auflage edn, Springer Spektrum.

URL: <http://d-nb.info/1071247999/04>

Lowrie, W. (2007), *Fundamentals of Geophysics*, second edition edn, Cambridge University Press.