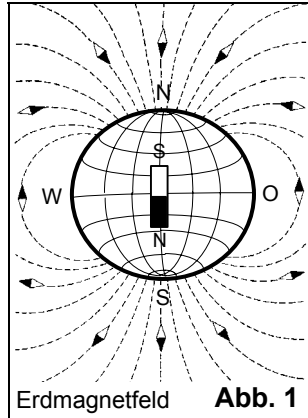


# Die Geomagnetik

(ingenieurgeophysikalischer Einsatz)



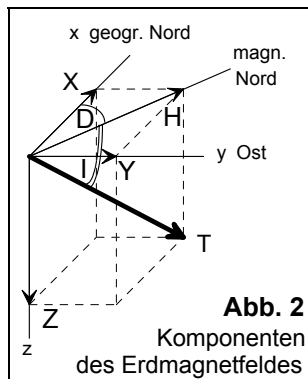
Erdmagnetfeld **Abb. 1**

## Aufgabe

Erfassung des Erdmagnetfeldes bzw. dessen Anomalien

## Anwendungen

- Suche und Erkundung von Gesteinsvorkommen (z.B. Magmatite) sowie insbesondere von Erzlagerstätten bzw. lithologischer Gliederung
- Erkundung von Störungszonen bei kristallinem Untergrund
- Suche von Eisenobjekten (z.B. Leitungen, Tanks, Fässer, Bomben)
- Erkundung von Deponien (z.B. Berandung, Gliederung, Mächtigkeitsabschätzung)
- Nachweis von Pleistozänrinnen für hydrogeologische Zwecke
- Erkundung für archäologische Fragestellungen (z.B. Brennöfen, Ziegelbauten, Gräben)
- Vorlaufuntersuchung für den gezielten Einsatz weiterführender Erkundungen



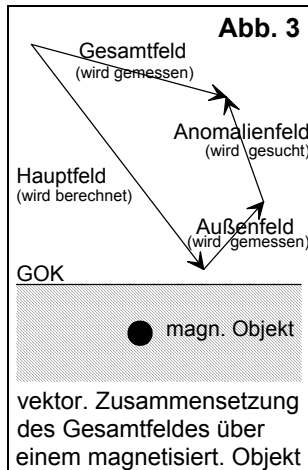
**Abb. 2**  
Komponenten  
des Erdmagnetfeldes

## Erdmagnetfeld und -komponenten

Die Erde besitzt, hauptsächlich verursacht durch Ströme in ihrem Innern, ein Magnetfeld. In der Abb. 1 ist der globale Feldverlauf skizziert: Das Magnetfeld entspricht vereinfacht dem eines Stabmagneten im Zentrum der Erde. Gestrichelt sind dessen Feldlinien außerhalb des Erdkörpers gezeichnet. An ihnen würde sich eine frei bewegliche Magnetnadel (Kompaß) wie dargestellt ausrichten.

Das Magnetfeld der Erde ist ein Vektorfeld. Folgende Bezeichnungen werden verwendet (siehe Abb. 2):

- T* Totalintensität
- H* Horizontalkomponente
- X* und *Y* Komponenten von *H*
- Z* Vertikalkomponente
- I* Inklination (Abweichung von der Horizontalen)
- D* Deklination (Abweichung magnetisch von geographisch Nord)



**Abb. 3**  
vektor. Zusammensetzung  
des Gesamtfeldes über  
einem magnetisiert. Objekt

## Zusammensetzung des Erdmagnetfeldes

Das Gesamtfeld der Erde setzt sich aus folg. vektoriiellen Anteilen zusammen (s. Abb. 3):

- Hauptfeld** *Es ist der vorherrschende Feldanteil mit einer relativ geringen, aber langzeitlichen Änderung. Sein Ursprung liegt im Erdinnern.*
- Außenfeld** *Es erreicht nur einen Bruchteil der Hauptfeldintensität, ändert sich aber zeitl. relativ rasch. Die Ursache liegt außerh. der festen Erde.*
- Anomalienfeld** *Es ist meist viel kleiner als das Hauptfeld und zeitlich nahezu konstant. Der Ursprung liegt in der oberen Erdkruste.*

Für die Belange der Ingenieurgeophysik ist das Anomalienfeld von Interesse. Magnetfeldanomalien sind örtliche Abweichungen vom Haupt- und Außenfeld. Ihre natürlichen Ursachen liegen in Magnetisierungskontrasten der Gesteine und insbesondere ihrem Gehalt an ferromagnetischen Mineralen. Künstliche Ursachen sind v.a. verborgene Eisenobjekte oder auch Bauobjekte, welche einen Magnetisierungskontrast bewirken.

## Größenordnung von Magnetfeldwerten

(Totalintensität der magnetischen Flußdichte  $B$  in üblichen Meßhöhen)

Hauptfeld: um 47.000 nT in mitteleuropäischen Breiten

Außenfeld: meist unter 50 nT, teilweise jedoch auch mehrere 100 nT

Anomalienfeld:	Erzlagerstätten: mehrere 10.000 nT	archäologische Objekte: bis 50 nT
	Metallfaß, 2 m tief: bis 100 nT	Hausmülldeponien: über 2.000 nT
	Pleistozänrinnen: etwa 100 nT	Pkw 5 m entfernt: bis 200 nT
	Basaltlagerstätte: 500 nT	Pipeline (30 cm Durchmesser) 10 m entfernt: 100 nT

**induktive Magnetisierung**

Im Vakuum ist die magnetische Flußdichte B (Induktionswirkung des Magnetfeldes, deswegen auch als magnetische Induktion bezeichnet) der vorliegenden Feldstärke H proportional

$$B = \mu_0 H \quad \mu_0 \text{ universelle magnetische Feldkonstante}$$

Bringt man Materie in ein Magnetfeld, so erhöht sich die Flußdichte B durch einen Feldzuwachs, verursacht durch die induzierte Magnetisierung  $M_i$  der eingebrachten Materie

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M_i$$

In der Magnetisierung  $M_i$  stecken stoffliche Eigenschaften, die mit der Permeabilitätszahl  $\mu_r = 1 + M_i/H$  oder der Suszeptibilität  $\chi = M_i/H$  beschrieben werden können. Damit läßt sich vorige Gleichung wie folgt formulieren:

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 (1 + \chi) H$$

Die Permeabilitätszahl  $\mu_r$  ist der Faktor, um den die magnetische Flußdichte durch das Einbringen von Materie in das Feld verändert wird.

Für die Geomagnetik ist folgende Einteilung relevant:

deutliche Verstärkung der Flußdichte bewirken

Ferromagnetika	$\mu_r \gg 1$ (z.B. Eisen $\mu_r \sim 1.000$ , Nickel $\mu_r \sim 300$ )
Ferrimagnetika	$\mu_r \gg 1$ (z.B. Magnetit $Fe_3O_4$ $\mu_r \sim 15$ , Maghämit $\gamma Fe_2O_3$ $\mu_r \sim 15$ )

i.a. vernachlässigbaren Einfluß auf die Flußdichte haben

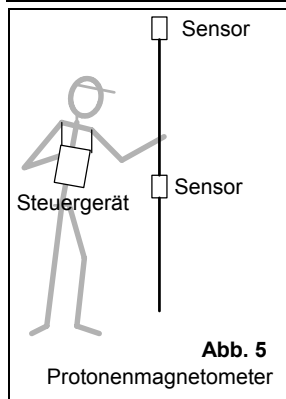
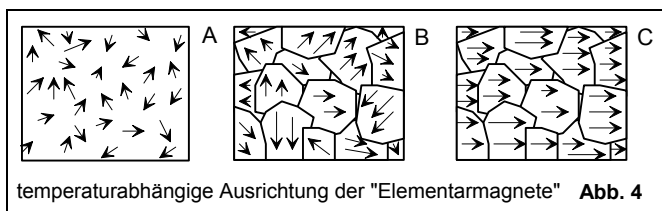
Paramagnetika	$\mu_r > 1$ (z.B. Aluminium $\mu_r \sim 1.000.023$ , Olivin $\mu_r \sim 1.000.500$ , Pyrit $\mu_r \sim 1.000.050$ )
Diamagnetika	$\mu_r < 1$ (z.B. Kupfer $\mu_r \sim 0,999.991$ , Quarz $\mu_r \sim 0,999.985$ , Steinsalz $\mu_r \sim 0,999.990$ )
Antiferromagnetika	$\mu_r > 1$ (z.B. Hämatit $\alpha Fe_2O_3$ $\mu_r \sim 1.001$ )

Die meisten Minerale sind para- oder diamagnetisch. Wichtig sind die Eisenoxide, welche die meisten ferrimagnetischen Minerale bilden. Der Gesteinsmagnetismus richtet sich nach der Mineralzusammensetzung. Entsprechend der starken Wirkung der Ferro- und Ferrimagnetika bilden diese als Mineralbestandteil der Gesteine bzw. in Form von Eisenteilen die in der Ingenieurgeophysik gesuchten Anomalien. Da Eisen mit Abstand der am meisten in der Bautechnik verwendete ferromagnetische Stoff ist, können Magnetometer i.a. sehr gut als selektive Eisendetektoren eingesetzt werden.

**remanente Magnetisierung**

Die Magnetisierung von Ferro- und Ferrimagnetika setzt sich aus dem zuvor beschriebenen induktiven ( $M_i$ ) und aus einem remanenten Anteil  $M_r$  zusammen. Die remanente Magnetisierung ist permanent und fest mit der Materie verbunden. Wesentl. Ursachen remanenter Magnetisierung sind u.a. thermische, sedimentäre und chemische Vorgänge.

**Thermoremanenz** Die magnetischen Eigenschaften von Atomen können vereinfacht durch Elementarmagnete, wie in Abb. 4 als Pfeile dargestellt, beschrieben werden. Oberhalb der sog. Curie-Temperatur (Eisen:  $T_C \sim 700$  °C) sind die Richtungen dieser Elementarmagnete infolge Temperaturbewegung willkürlich orientiert, sodaß das Gesamtfeld in etwa den Wert Null annimmt (A). Unterhalb der Curie-Temperatur ordnen sich die Elementarmagnete parallel innerhalb von Domänen an (B), welche eine definierte Magnetisierung besitzen. Wenn die Materie bei Vorhandensein eines äußeren Magnetfeldes unter die Curie-Temperatur abkühlt, werden die im äußeren Magnetfeld ausgerichteten Elementarmagnete "eingefroren" (C) und die Materie ist permanent magnetisch (Thermoremanenz). Dieser Effekt wird v.a. bei der Aufklärung der langzeitlichen



(säkularen) Entwicklung des Erdmagnetfeldes ausgenutzt. Daneben ergibt sich daraus auch eine Anwendung innerhalb der Archäometrie (z.B. gebrannte Ziegel, Brennöfen).

**Sedimentationsremanenz** Bei der Sedimentation von ferrimagnetischen Mineralen in Wasser kann es zur gerichteten Ablagerung infolge des Erdmagnetfeldes kommen. Voraussetzung ist, daß die Partikel ein ausreichendes magnetisches Moment besitzen, um sich im Erdmagnetfeld (ähnlich einem Kompaß) während des Sedimentationsprozesses auszurichten. Das Sediment wird dadurch permanent magnetisch (Sedimentationsremanenz).

**Chemoremanenz** Die chemische Neu- oder Umbildung eines ferrimagnetischen Minerals im Erdmagnetfeld bewirkt, daß dieses eine permanente Magnetisierung annimmt.

**Viskose Remanenz** Durch langandauernde Einwirkung eines äußeren Feldes (Erdmagnetfeld) kann ein Gestein zunehmend magnetisiert werden. Die Stärke richtet sich nach der Einwirkdauer und kann oft durch eine logarithmische Zeitfunktion beschrieben werden.

Weitere Remanenzarten: isothermale Remanenz, Druckremanenz, inverse Remanenz

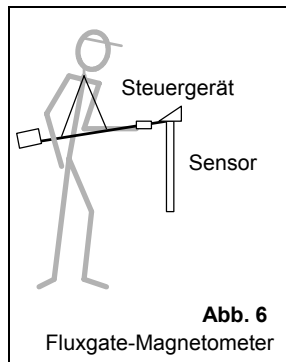


Abb. 6  
Fluxgate-Magnetometer

### Feldmeßgeräte

Mit dem Protonen-Präzession-Magnetometer wird der Betrag der Totalintensität der magn. Flußdichte  $B$  in nT gemessen (siehe Abb. 5). Dieses Magnetometer muß nur grob orientiert werden. Der Meßablauf ist schnell (i.a.  $< 5$  sek/Meßpunkt) und die Meßgenauigkeit sehr hoch (i.a.  $< 1$  nT).

Mit dem Sättigungskern-Magnetometer (Fluxgate-Magnetometer, siehe Abb. 6) wird eine Feldkomponente (i.a.  $Z$ ) der magn. Flußdichte  $B$  in nT gemessen. Das Gerät muß genau entsprechend der Feldkomponente ausgerichtet werden; der Meßzyklus verläuft sehr schnell (i.a.  $< 1$  sek/Meßpunkt) und die Genauigkeit ist hoch (i.a.  $< 20$  nT). Die Meßgenauigkeit und -geschwindigkeit können je nach Anwendungszweck des Geräts sehr unterschiedlich sein.

Weitere seltenere Magnetometer: Cäsium-Magnetometer, Feldwaage, Absorptionszellen-Magnetometer, SQUID-Magnetometer

### Anwendungsart

Gemessen wird entweder der Betrag bzw. eine Komponente der magnetischen Flußdichte oder deren Gradient (meist Vertikalgradient). Dies geschieht entweder entlang von Profillinien als Profilierung oder flächendeckend mit einem bestimmten Meßraster als Kartierung. Enge Meßraster für Detailuntersuchungen liegen bei etwa 1 m, wogegen bei Übersichtsuntersuchungen die Meßpunktabstände 5 m und teilweise mehr betragen können. Daneben wird an festen Basisstationen der zeitliche Verlauf des Magnetfeldes (Außenfeld) registriert, um die Magnetfeldwerte vom zeitlichen Einfluß befreien zu können. Dies ist bei Gradientenmessungen nicht notwendig.

Die Dichte des Meßrasters richtet sich v.a. nach der "Rauhigkeit" der Anomalienform. Die Anomalienform und -stärke ist u.a. durch den Meßabstand zur Anomalienursache bedingt. Beispielsweise nehmen die Amplituden einer lokalen Dipolanomalie mit der 3. Potenz der Entfernung ab. Die Meßwertaufnahme in mehreren Abständen bzw. Meßhöhen läßt sich günstig zur Massen- und Tiefenabschätzung ausnutzen. Die Meßhöhen liegen i.a. zwischen 1,0 und 2,5 m über der Geländeoberkante (GOK).

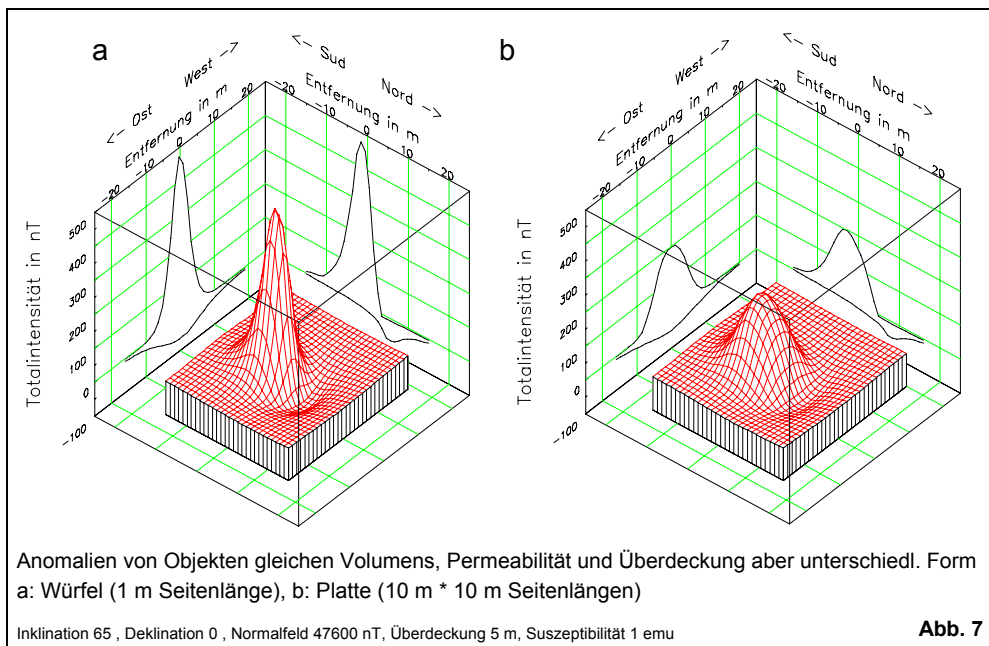
### Darstellung und Beurteilung der Meßwerte

Die Magnetfeldanomalien (Totalfeld, Feldkomponenten, Gradient) werden üblicherweise in Profildiagrammen, Isolinienplänen (Isogammen) oder Farbdigrammen dargestellt. Zuvor werden notwendige Korrekturen durchgeführt, z.B. die Anteile des Haupt- und Außenfeldes reduziert. Eine Höhenreduktion ist nur in Spezialfällen notwendig.

Die einfachste Datenauswertung ist die Ortsangabe aufgrund der Anomalienposition, die Tiefenabschätzung aufgrund ihrer Halbwertsbreite und eine Massenklassifizierung aufgrund ihrer Stärke. Dies geschieht i.a. unter vereinfachenden Annahmen der Objektformen (z.B. Kugel, Platte) und ohne Berücksichtigung von remanentem Magnetismus.

Die anspruchsvollere Auswertung beinhaltet die rechnerische Modellierung der Anomalie, wobei die Objektgröße, -form und -tiefe, das Hauptfeld, die remanente Magnetisierung sowie v.a. die Permeabilität  $\mu_r$  einbezogen werden.

Die Abb. 7 veranschaulicht beispielhaft den Einfluß der Objektform sowie der Richtung des induzierenden Magnetfeldes. In Abb. 7a ist das magnetisierbare Material innerhalb eines kompakten Würfels konzentriert, wogegen es in Abb. 7b in einer flachen Scheibe verteilt ist und dadurch eine deutlich schwächere Anomalienstärke bewirkt. Daneben ist in beiden Bildteilen zu bemerken, daß das Anomalienmaximum gegenüber der Objektposition ( $x/y = 0/0$ ) leicht verschoben ist. Dies wird durch die Richtung des induzierenden Erdmagnetfeldes (siehe Abb. 1) bewirkt. Entsprechend ergibt sich durch die geomagnetischen Breite des Meßortes auf der Erde eine Verschiebung des Anomalienmaximums.



In einfachen Fällen und bei geringen Objektiefen kann die Verschiebung unberücksichtigt bleiben, falls der Ortsfehler tolerierbar ist. Durch die sog. Polreduktion können die Anomalien zur besseren Positionsbestimmung auf die Inklination  $90^\circ$  (Pol) transformiert werden. Im Falle von ausschließlich induziertem Magnetismus liegen die Anomalienmaxima dann direkt über dem Objekt.

**Bemerkungen**

Sehr wichtig bei der Geomagnetik ist die genaue Dokumentierung von störenden Eisenobjekten wie Maste, Fahrzeuge, Zäune usw. Diese haben starken Einfluß auf die Meßwerte und müssen in jedem Fall bei der Auswertung berücksichtigt werden.

Aus Obigem geht hervor, daß einerseits bei mäßigen Genauigkeitsansprüchen die Geomagnetik mit geringem Aufwand sehr schnell brauchbare Ergebnisse liefern kann. Andererseits kann insbesondere der Auswerteaufwand umfangreich werden, falls möglichst präzise Aussagen gemacht werden sollen.

Da die Messungen i.a. sehr schnell gehen, liegt der Aufwand für die Feldmessungen v.a. im Festlegen der Meßpunkte und Abschreiten des Meßgebietes. Entsprechend spielt die Zugänglichkeit eine große Rolle.

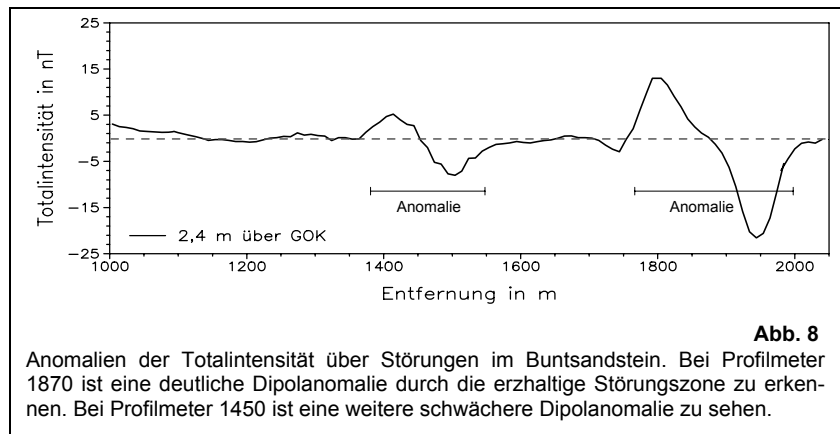
**kombinierbare Verfahren**

- Georadar und Metalldetektor bei der Objektsuche
- Geoelektrik und Elektromagnetik bei großräumiger Erkundung

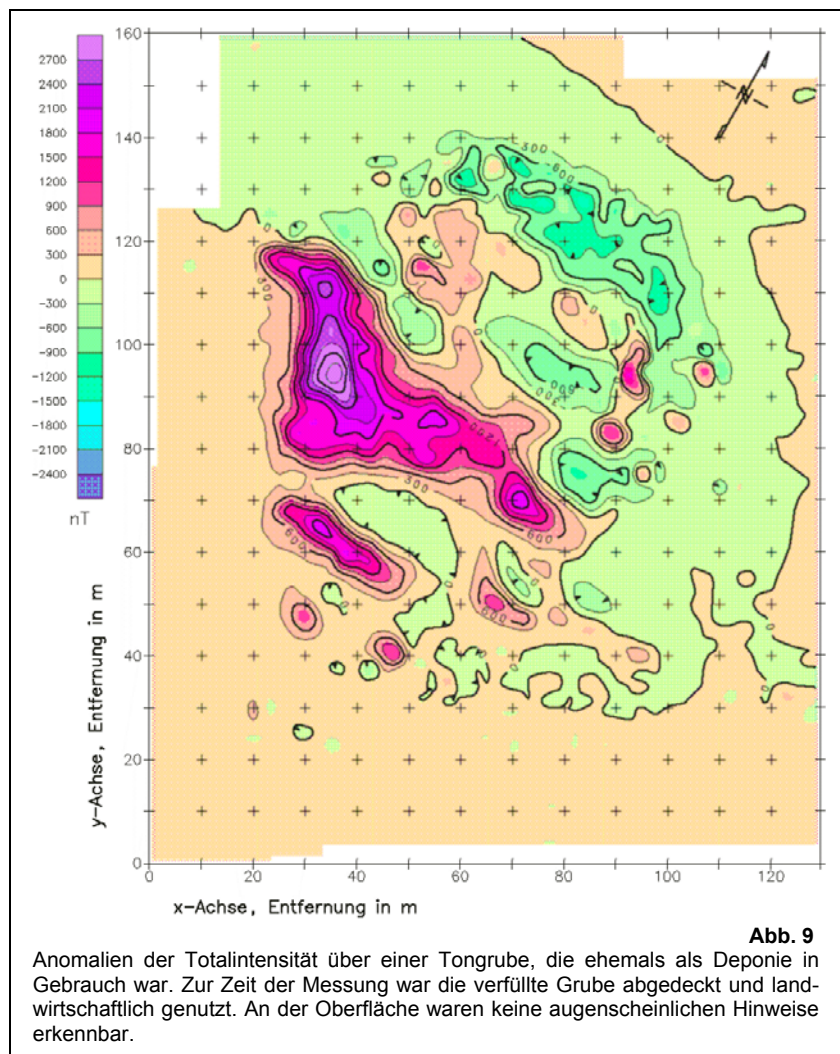
**Datenbeispiele**

In der **Abb. 8** ist der Anomalienverlauf über einer mineralisierten Störung im Buntsandstein zu sehen. In der Störungszone sind ferrimagnetische Erze enthalten, welche einen schwachen magnetischen Kontrast zum umgebenden Sandstein bilden. Die Störungszone ist anhand von zwei getrennten Dipolanomalien um Profilmeter 1870 und 1450 festzustellen.

Die **Abb. 9** zeigt den Anomalienverlauf über einer verfüllten Tongrube. Die Umrisse der Grube können anhand der Anomalienbegrenzung gut nachvollzogen werden. Daneben sind Auffüllungsbereiche bzw. größere Einzelobjekte anhand ihrer Dipolwirkungen in der Grube zu lokalisieren und klassifizieren.



**Abb. 8**  
Anomalien der Totalintensität über Störungen im Buntsandstein. Bei Profilmeter 1870 ist eine deutliche Dipolanomalie durch die erhaltige Störungszone zu erkennen. Bei Profilmeter 1450 ist eine weitere schwächere Dipolanomalie zu sehen.



**Abb. 9**  
Anomalien der Totalintensität über einer Tongrube, die ehemals als Deponie in Gebrauch war. Zur Zeit der Messung war die verfüllte Grube abgedeckt und landwirtschaftlich genutzt. An der Oberfläche waren keine augenscheinlichen Hinweise erkennbar.