

Geomagnetische Beobachtungen an Blitzeinschlagstellen

von

Hans Albert Roeser

mit 21 Abbildungen

Kurzfassung

Blitzeinschläge haben unterhalb der Erdoberfläche meist nur geringe Auswirkungen. Diese Arbeit untersucht die "remanente" (bleibende) Magnetisierung von Gesteinen durch das den Blitzstrom begleitende ringförmige Magnetfeld. Die remanente Magnetisierung kann über viele Jahre erhalten bleiben, obwohl das Magnetfeld des Blitzes nur den Bruchteil einer Sekunde eingewirkt hat.

Durch Blitzschlag magnetisierte Gesteine werden häufig an exponierten Stellen, z.B. Berggipfeln, gefunden, viel seltener jedoch in ebenem Gelände. Die hier beschriebene Blitzeinschlagstelle war bei der magnetischen Vermessung eines ziemlich unscheinbaren tertiären Vulkans bei Göttingen an dessen schwach ansteigendem Hang gefunden worden. Bei einer Folgeuntersuchung wurde das Magnetfeld über der Blitzeinschlagstelle zwei Mal sehr detailliert vermessen. Danach wurden bis in eine Tiefe von fast 3 m Gesteinsproben entnommen, die die für einen Blitzschlag erwartete ringförmige remanente Magnetisierung durch das Magnetfeld des Blitzes zeigen. Die remanente Magnetisierung nimmt mit zunehmender Entfernung von der Blitzbahn ab, in 5 m Entfernung beträgt sie nur noch ein Zehntel der Maximalwerte. Aus den gemessenen Magnetisierungen wurde berechnet, wie das Magnetfeld über der Einschlagstelle aussehen mußte. Das Rechenergebnis stimmt sehr gut mit den Messungen überein. Zwischen den beiden Vermessungen hatte ein weiterer Blitz an exakt der gleichen Stelle eingeschlagen. Ein Grund dafür, daß mindestens zwei Mal Blitze an dieser nicht weiter auffälligen Stelle eingeschlagen haben, konnte nicht gefunden werden.

Abstract

Below the surface of the Earth lightning strokes have only small effects. One of them is the remanent magnetization of rocks by the circular magnetic field that accompanies the current of the lightning. This remanent magnetization can persist over many years although the magnetic field of the lightning lasted only a fraction of a second.

Rocks magnetized by lightning are often found at conspicuous points like mountain peaks, much more seldom however in flat terrain. During a geomagnetic survey the lightning stroke place described here was found on the gently rising flank of a fairly modest Tertiary volcano near Göttingen. The follow-up investigations started with two detailed surveys of the magnetic field in the vicinity of the stroke place. Afterwards rock samples were taken down to a depth of nearly 3 m. They show the circular remanent magnetization that can be expected due to the magnetic field of the lightning. The remanent magnetization decreases with increasing distance from the axis, at 5 m distance it is only a tenth

of the strongest values. The observed magnetizations were used to calculate the magnetic field over the lightning stroke place. The results fit perfectly to the observations. Between the two surveys and before the sampling a lightning stroke occurred at exactly the same place. No reason was found why lightning strokes prefer this inconspicuous place.

Natur und Entstehung von Blitzen

Blitze gehören zu den eindrucksvollsten Naturerscheinungen, wir können sie meist mehrere Male im Jahr erleben. In der Mythologie vieler Kulturkreise wurden Blitz und Donner den höchsten Göttern zugeordnet. Bei den Griechen war das der Göttervater Zeus, bei den Römern Jupiter. In der germanischen Mythologie war Donar für Blitz und Donner zuständig. Im alten Testament zeigte sich Gott oft im Donner. Die griechischen Philosophen hatten zwar erkannt, daß Blitz und Donner zusammengehörten und in engem Zusammenhang mit Gewitterwolken standen. Aber eine halbwegs realistische Erklärung für diese Naturphänomene fanden sie nicht.

Die nicht mythologisch geprägte, moderne Blitzforschung beginnt mit BENJAMIN FRANKLIN (1706 - 1790) (OVERHOFF, 2006). Er hatte 1752 während eines Gewitters einen Drachen an einem Draht aufsteigen lassen und festgestellt, daß er am unteren Ende des Drahts Funken ziehen konnte. Das Gleiche hatten DALIBARD und DELORS in Frankreich kurz vorher mit einer isoliert aufgestellten Metallstange festgestellt. Das Experiment war ihnen von Franklin vorgeschlagen worden. Damit war gesichert, daß der Blitz eine elektrische Erscheinung ist.

Zu den gesamten Erscheinungen, die mit Blitzen verbunden sind, ist kürzlich eine sehr umfangreiche Monographie von RAKOV & UMAN (2003) erschienen. DWYER (2005) faßt viele neue Erkenntnisse in knapper Form zusammen. HERMANT (2002) ist nicht nur eine großartige Sammlung zahlreicher Blitzfotos, sondern erläutert auch, welche Prozesse die Vielfalt der Blitzerscheinungen verursachen.

Für einen Geowissenschaftler, der sich mit der festen Erde befaßt, ist es enttäuschend, wie wenig diese Werke den Verlauf des Blitzstromes in der Erde behandeln. Hierfür gibt es nur mehr oder weniger umfangreiche Zeitschriftenaufsätze. Insbesondere PORADA & WITTIG (1975) zeigen die Vielfalt der Aspekte. MEYER (2000) berichtet über einen Fund fossiler Blitzröhren und gibt einen Überblick über die einschlägige Literatur, die vorwiegend älteren Datums ist.

Erscheinungen an Blitzeinschlagstellen

Ein großer Teil der Blitze bewirkt einen Potentialausgleich zwischen den Wolken und dem Erdboden. Die Vorgänge an einer Blitzeinschlagstelle hängen stark vom Untergrund ab (PORADA & WITTIG, 1975). Zum Potentialausgleich kommt es erst, wenn der Blitz eine leitfähige Schicht im Untergrund erreicht. In der Regel ist dafür eine gewisse Feuchtigkeit notwendig. Viele Gesteine sind auch in trockenem Zustand etwas leitfähig, andere werden bei Erhitzung durch den Blitzstrom leitfähig.

Letzteres ist z.B. bei trockenem Wüstensand der Fall. Der Blitzstrom bleibt im Boden auf einen engen Kanal beschränkt, in dem der Sand aufschmilzt und zum Teil sogar verdampft. Das Gestein neben diesem Kanal bleibt weiterhin elektrisch nicht leitfähig, so daß sich der Kanal nur wenig oder gar nicht verzweigt. Wenn in der Tiefe ein Bereich mit höherer Leitfähigkeit erreicht wird, verteilt sich dort der Strom über eine größere Fläche. Weil damit die Erwärmung verringert wird, läßt sich der Weg der Blitzes von dieser Tiefe an nicht mehr an Hand seiner Wärmewirkung verfolgen.

Aus den aufgeschmolzenen Sandkörnern entsteht eine amorphe Masse, die sich nach dem Blitzschlag sehr schnell wieder verfestigt. Die dabei entstehende stabile Röhre hat einen Durchmesser von 1 - 2 cm, man nennt sie Fulgurit oder Blitzröhre. Die bis zu 18 m langen Röhren zerbrechen oft in viele Teilstücke, weil sie sich bei der Abkühlung zusammenziehen (abb.1).

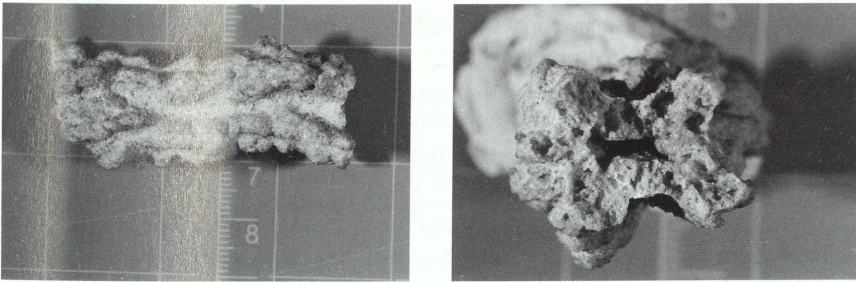


Abb. 1: 5 cm langes Bruchstück eines Fulgurits aus der algerischen Sahara; links Längsansicht mit einer der typischen Rillen und einigen Wulfstreifen, rechts Bruchfläche, die die poröse Struktur und den teilweise zusammengebrochenen Hohlraum längs der Achse zeigt

Die mittlere Dichte trockenen Sandes ist $1,5 \text{ g/cm}^3$, er enthält ca. 50 % Hohlräume. Bei der Erhitzung des Sandes durch den Blitz dehnt sich die Luft zwischen den Sandkörnern proportional zur absoluten Temperatur aus. Bei der anschließenden Abkühlung nimmt das Luftvolumen wieder ab. Die Matrix verfestigt sich schon weit oberhalb der normalen Umgebungstemperatur, so daß die Luftbläschen nicht mehr voll zusammenbrechen können, also ein sehr poröses Material entsteht. Auch der leere axiale Innenraum bricht zumeist nicht vollständig zusammen. Außen haben Fulgurite oft lange Rillen und dazwischen wulstige Ketten (Abb. 1). Ob die langen Rillen Nebenbahnen des Blitzstroms sind, scheint bisher nicht bekannt zu sein. Jedenfalls war im Stadium der Abkühlung das Material hier noch heißer und ist in die zentrale Röhre eingebrochen, während die wulstigen Streifen bereits weiter erhärtet waren und weniger nachgaben. Andere Blitzröhren weisen als einzige markante Struktur den durchgehenden axialen Hohlraum auf. Die typische mittlere Dichte von Fulguriten ist $0,5 \text{ g/cm}^3$.

Wenn Blitze in Felsen einschlagen, können durch die Hitzewirkung Stücke herausgeschlagen werden, die in einem Umkreis von einigen Metern herumliegen (PORADA & WITTIG, 1975).

Insgesamt sind die geologischen Wirkungen von Blitzen nur gering, es handelt sich meist eher um Kuriosa, die natürlich trotzdem interessant sind. Das gilt besonders für die an einigen Stellen in Deutschland gefundenen fossilen Blitzröhren (MEYER, 2000).

Das Magnetfeld eines Blitzes und seine Wirkung auf Gesteine

Jeder elektrische Strom ist von einem Magnetfeld umgeben (Abb. 2). Die Stärke H dieses Magnetfeldes ergibt sich aus der Stromstärke I und dem Abstand r von der als geradlinig angenommenen Strombahn aus der Formel

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

Die Feldstärke nimmt also bei wachsender Entfernung umgekehrt proportional zur Entfernung von der Strombahn ab.

Dieses Magnetfeld überlagert das Magnetfeld der Erde, über das an dieser Stelle ein kurzer Überblick erforderlich ist. Wie im Erdmagnetismus üblich, wird als Einheit des Magnetfeldes (genauer der Induktion) das Nanotesla (nT) verwendet. Dabei ist $1 \text{ nT} = 10^{-9}$ Tesla, 1 Tesla ist 1 Vs/m^2 .

Das "erdmagnetische Hauptfeld" entsteht durch elektrische Ströme im flüssigen äußeren Kern der Erde, der den Tiefenbereich 3000 - 5000 km unter der Erdoberfläche umfaßt. Die Stärke dieses Feldes liegt in der Größenordnung 50 000 nT.

Dieses Feld wird kleinräumig durch magnetische Gesteine (z.B. Basalt) und Erze (z.B. Magnetit) in der Erdkruste, der im Mittel 30 km mächtigen äußersten Schicht des Erdkörpers, verändert. Im allgemeinen betragen diese Veränderungen einige 100 nT, sie können aber auch einige 10 000 nT erreichen.

Viele Materialien können durch ein Magnetfeld magnetisiert werden, man bezeichnet sie als "magnetisierbar". Dabei gibt es zwei Arten der Magnetisierung. Die erste ist die sogenannte "induzierte Magnetisierung", die verschwindet, wenn das Magnetfeld verschwindet. Daneben gibt es noch eine "remanente Magnetisierung" oder kurz "Remanenz", die nach dem Verschwinden des Magnetfeldes erhalten bleibt. Schon nach einer minimalen Einschaltdauer des Magnetfeldes von z.B. 1 ms ist diese Remanenz da und bleibt danach für lange Zeit erhalten. Induzierte und remanente Magnetisierung sind für verschiedene Materialien verschieden. Sie stehen in keinem festen Verhältnis zueinander, sind aber in der Regel in der gleichen Größenordnung.

POCKELS (1898) hat die remanente Magnetisierung genutzt, um die Stromstärke von Blitzen abzuschätzen. Dazu hat er in der Nähe eines Blitzableiters Gesteinsproben platziert, die bei einem Einschlag von dem Blitzstrom magnetisiert wurden.

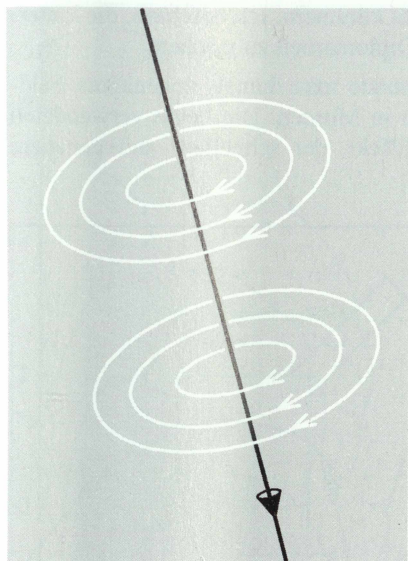


Abb. 2:

Magnetfeld eines von links oben nach rechts unten verlaufenden Stroms; die Magnetfeldlinien um diesen Strom herum sind weiß dargestellt.

Wenn ein Blitz in magnetisierbares Gestein einschlägt, erzeugt sein Magnetfeld im Gestein außer der induzierten Magnetisierung auch eine remanente Magnetisierung, die nach dem Blitzeinschlag noch erhalten bleibt. Wegen der hohen Stromstärke des Blitzes sollte die remanente Magnetisierung so hoch sein, daß sie das Magnetfeld in der Umgebung verändert. Man müßte also an einer Blitzschlagstelle eine Abweichung des Magnetfeldes vom normalen Wert finden, eine sogenannte "Anomalie" des Magnetfeldes.

An exponierten Bergspitzen werden tatsächlich solche Anomalien gefunden (z.B. HUMBOLDT, 1797). Sie können so stark sein, daß der Kompaß stark abgelenkt wird. So gibt es am Gipfel des Malchen im Odenwald einen Gesteinszug mit dem Namen "Magnetklippen". Von solchen Beobachtungen mögen die Sagen von Magnetbergen herrühren, die die eisernen Nägel aus Schiffen ziehen können, die dann mit Mann und Maus untergehen.

Detaillierte Vermessung einer Blitzeinschlagstelle bei Göttingen

Da Blitze nicht nur in Bergkuppen einschlagen, sollte man durch Blitze verursachte Anomalien auch in ebenem Gelände finden können. Als ich 1961 am Geophysikalischen Institut in Göttingen nach einem Thema für meine Diplomarbeit in Geophysik suchte, erzählte der Doktorand Wolfgang Meitzner, daß er bei seiner Vermessung des Backenberges bei Güntersen, einer flachen tertiären Basaltkuppe in der Nähe von Göttingen, einige Stellen gefunden habe, an denen das Magnetfeld extrem stark von den Werten der Umgebung abwich. Da Herrn Meitzners Aufgabe die Gesamtvermessung der Kuppe mit einem Punktabstand von in der Regel 100 m war (MEITZNER, 1962), konnte er sich um die wenigen

Punkte mit extremen Magnetfeldwerten nicht kümmern. Ich beschloß, die Untersuchung dieser Punkte zum Thema meiner Diplomarbeit zu machen.

Für Magnetfeldmessungen im Gelände benutzte man damals sogenannte Feldwaagen. Diese Geräte findet man nur noch in Museen. Die heute verwendeten Geräte nutzen einen kernphysikalischen Effekt, der schnellere und genauere Messungen ermöglicht.

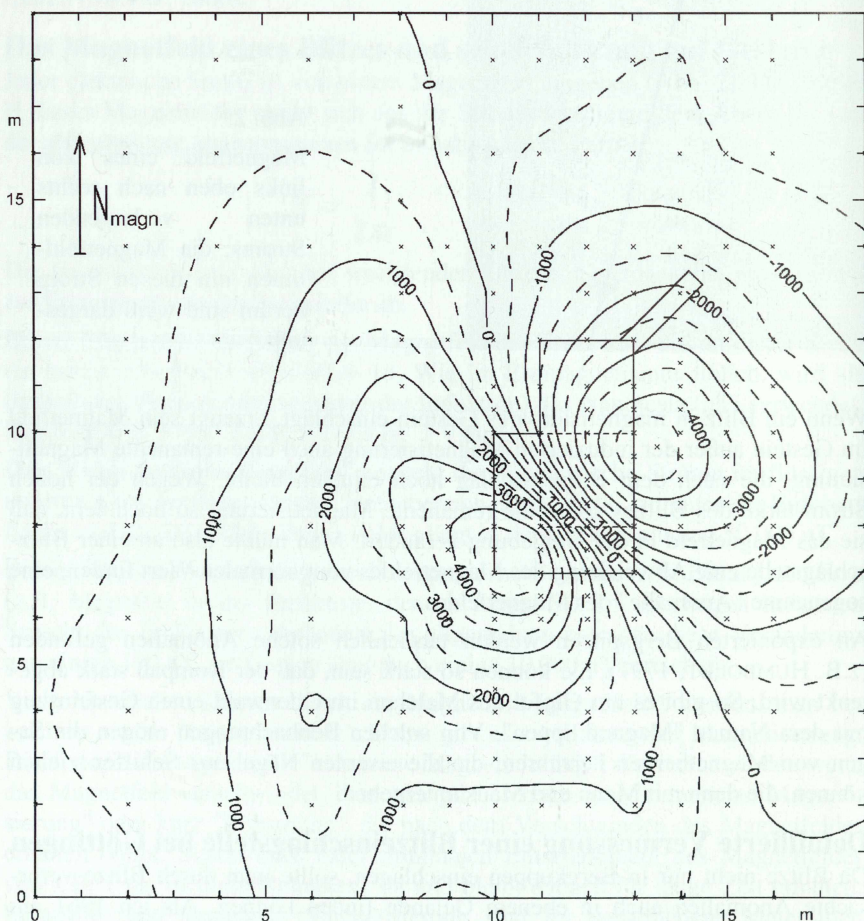


Abb. 3: Vertikalintensität des Magnetfeldes an der Anomalie I, erste Vermessung. Die Kreuze sind die Meßpunkte. Die Zahlen sind die Abweichungen des Magnetfeldes vom mittleren Feld der Umgebung. Der Rahmen im Zentrum zeigt die Fläche der späteren Ausgrabungsarbeiten.

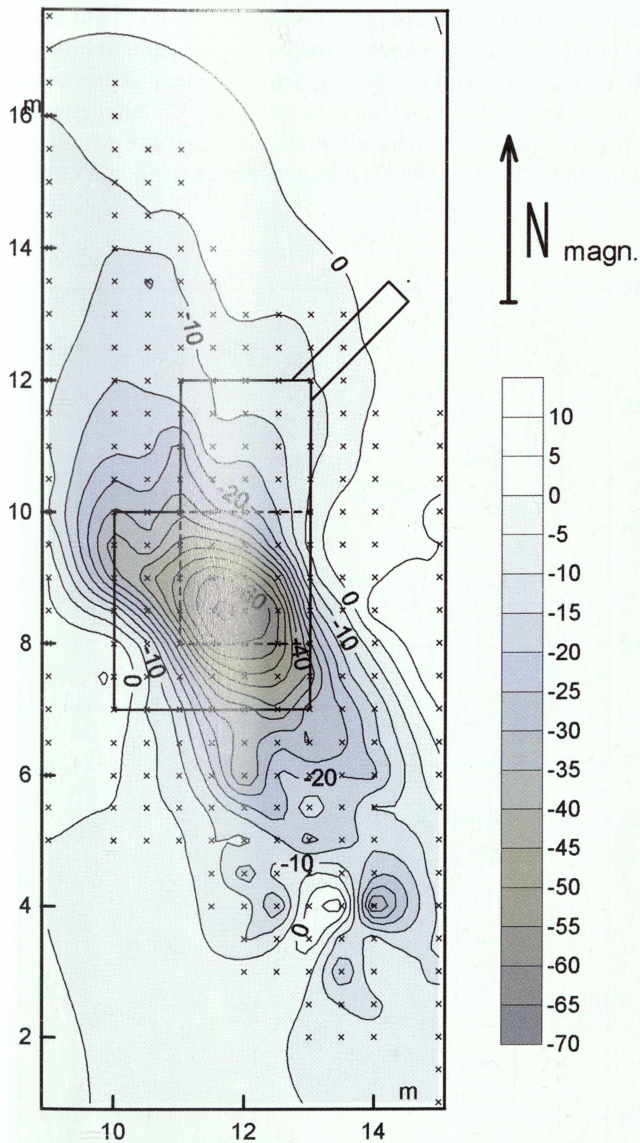


Abb. 4:
Deklination des
Magnetfeldes in
Grad dicht am
Boden für Anoma-
lie I. Die
Messungen wurden
mit einem Kompaß durch-
geführt. Der
Wert -45° bedeu-
tet also, daß die
Kompaßnadel
genau nach NW
zeigte.

Abb. 3 zeigt das Ergebnis meiner Vermessung an einem dieser Punkte. Innerhalb weniger Meter ändert sich das Feld um 9000 nT. Das ist ca. das 100-fache dessen, was sonst auf 10 m Distanz auf dem Backenberg beobachtet wird. Aus diesem Bild kann man nicht eindeutig auf die Magnetisierung der Gesteine im Untergrund schließen. Z.B. könnte es hervorgerufen sein durch einen 1 m langen waagerechten Stabmagneten in einer Tiefe von 2 m, der von SW nach NE ge-

richtet ist. Tatsächlich ist es nicht leicht, sich vorzustellen, wie das Feld einer ringförmigen Magnetisierungsverteilung aussehen müßte. Bei den anderen Punkten, an denen Herr Meitzner ungewöhnliche Magnetfeldwerte beobachtet hatte, waren die Störungen um einen Faktor 10 kleiner. In der Form ähnelten sie der Anomalie in Abb. 3: Stets lag dem Maximum ein etwa gleich großes Minimum gegenüber, die Feldänderung war im Gebiet zwischen diesen beiden Punkten besonders steil.

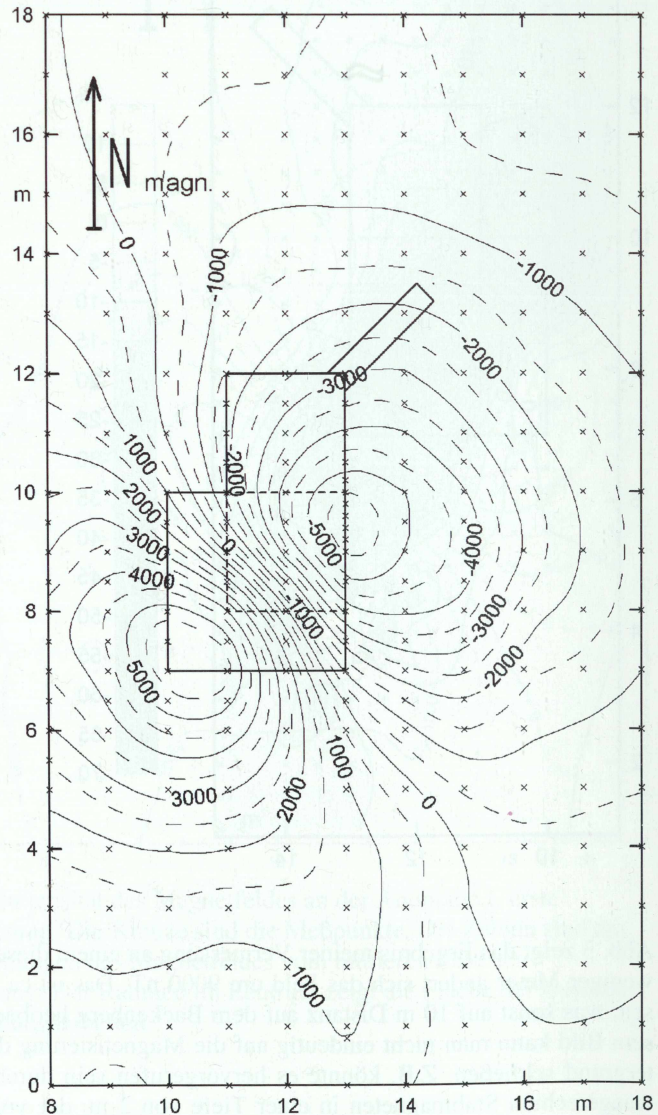


Abb. 5:
Vertikalintensität
des Magnetfeldes
an der Anomalie I,
zweite Vermessung;
die Anomalie ist um
ca. 20 % stärker
als bei der ersten
Vermessung.

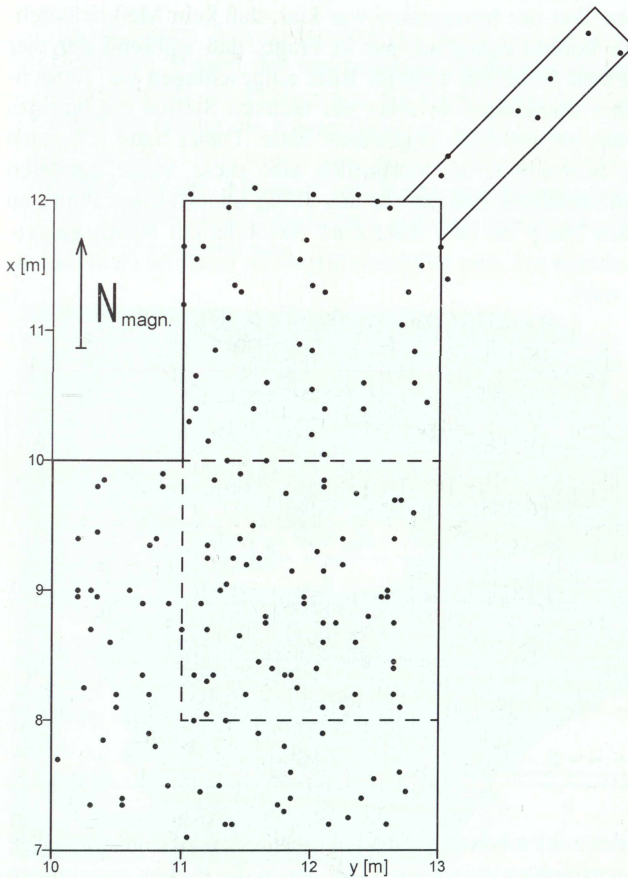


Abb. 6:
Grundriß des zur Probenentnahme gegrabenen Loches. Die Punkte geben die Lage der entnommenen Proben an. Der gestrichelt umrandete Teil ist tiefer gegraben als die anderen Flächen. Der schräge Stichgraben im Nordosten ist nur knapp 1 m tief.

Ich erwartete, daß das Ergebnis einer Vermessung der Deklination des Magnetfeldes (das ist der Winkel zwischen geographisch Nord und der horizontalen Richtung des Magnetfeldes) leichter verständlich sein würde: Die Richtungen müßten doch parallel zur Magnetisierungsrichtung der Gesteine sein, also ringförmig um die Einschlagstelle des Blitzes herum. Das Ergebnis war aber völlig anders: Fast durchweg zeigten die Richtungen nach Nordwesten, die Winkel gegenüber Norden lagen zwischen 0 und 70° (Abb. 4). Um die Ursache der Anomalien zu erkunden, war es also notwendig, Gesteinsproben zu entnehmen.

Ich entschied mich, das an der besonders markanten ersten Stelle zu tun. Bevor ich damit begann, habe ich das Feld noch einmal vermessen, um zu sehen, ob die Anomalie möglicherweise innerhalb der inzwischen vergangenen 4 Monate merklich abgenommen hätte. Das unerwartete Ergebnis war jedoch, daß die Anomalie um 20% zugenommen hatte, ohne daß sich die Form der Anomalie wesentlich verändert hatte (Abb. 5).

Nach einem sorgfältigen Test der Instrumente war klar, daß kein Meßgerätefehler vorlag. Als Ursache kommt eigentlich nur in Frage, daß während der vier Monate an genau derselben Stelle ein weiterer Blitz eingeschlagen ist. Tatsächlich war während meiner Messungen an einer der anderen Stellen ein heftiges Gewitter aufgetreten, das ich im Auto abgewartet hatte. Dabei hatte ich einen ganz nahen Einschlag beobachtet, der vermutlich also diese Stelle getroffen hatte. Daraus kann man schließen, daß ein für uns völlig unauffälliger Punkt an einem leicht abfallenden Hang für den Blitz eine Besonderheit haben kann – wenn es sich denn überhaupt um eine Blitzeinschlagstelle handelte (was damals ja noch nicht erwiesen war).

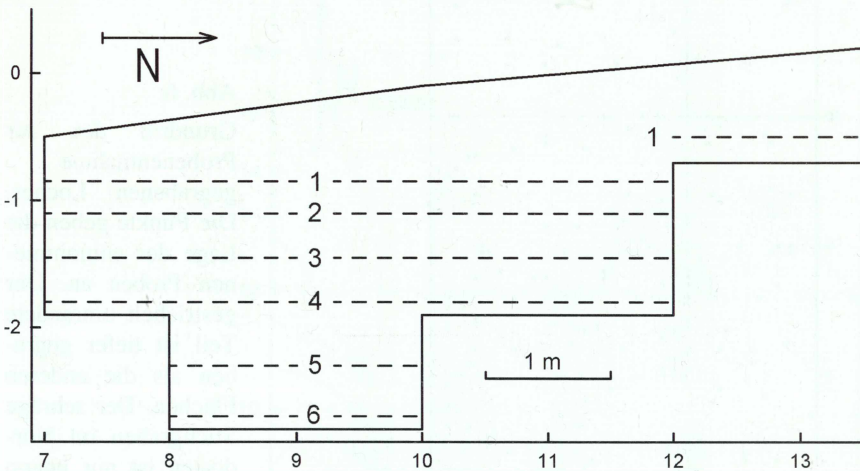


Abb. 7: Seitenriß des zur Probenentnahme gegrabenen Loches; gestrichelt sind die sechs Sohlen eingetragen, auf denen die Proben entnommen worden sind.

Die Magnetisierung von Gesteinsproben

Für die Probennahme habe ich ein hinreichend großes Loch gegraben, aus dem ich bis in die Tiefe, in der es noch nicht zu stark verwitterte Gesteinsbrocken gab, auf insgesamt 6 Sohlen Proben entnommen habe (Abb. 6, 7 und 8). Oberhalb der Sohle 1 gab es innerhalb der Humusschicht nur wenige feste Brocken, bei denen zudem die Gefahr bestand, daß ihre Richtung nicht zuverlässig war.

Jede Probe wurde zunächst vorsichtig soweit freigelegt, daß ihre Oberfläche gereinigt und mit Gips ein Aluminiumplättchen aufgebracht werden konnte. Das Aluminiumplättchen wurde mit einer Rundlibelle horizontalisiert. Nach Erhärten des Gipses wurde das Aluminiumplättchen entfernt und mittels einer in Nord-Süd-Richtung über das Loch gespannten Kordel die geographische Nordrichtung in die Gipsoberfläche eingeritzt. Danach wurden die Brocken vollständig freigelegt. Im Labor wurden mit einer Diamant-Kreissäge Würfel aus den Brocken ge-

schnitten, deren Achsen parallel zur Nord- und Ostrichtung sowie zur Lotrichtung waren. Wegen der beschränkten Größe des Gerätes für die Messung der Magnetisierung der Proben war die Kantenlänge auf maximal 1,7 cm begrenzt. Tatsächlich betrug die Kantenlänge oft weniger als 1 cm, weil die Brocken zum Teil nur sehr klein waren und größere Brocken vielfach bei der Verarbeitung zerfielen. Für die Messung von Stärke und Richtung der Magnetisierung wurde ein im Geophysikalischen Institut gebautes Gerät verwendet, das genau auf diese Aufgabe abgestimmt war.



Abb. 8: Blick von Süden in das zur Probenentnahme gegrabene Loch (29.11.1962)

Die mangelnde Stabilität des Gesteins und der hohe Grad der Zersetzung ist typisch für den Backenberg. Das zeigen die ungewöhnlich großen Halden der Steinbrüche an diesem Berg. BOLTER (1961) macht postvulkanische Exhalationen dafür verantwortlich.

In Abb. 9 zeigen die Kreise die Orte der einzelnen Proben, die Pfeile Richtung und Stärke des horizontalen Anteils der remanenten Magnetisierung. Die Richtungen verlaufen größtenteils ringförmig um die durch Kreuze markierten Punkte. Die Stärke der Magnetisierung nimmt tendenziell mit zunehmender Entfernung von den Kreuzen ab. Bei sehr kleinen Magnetisierungen ist die Richtung durch eine gestrichelte Verlängerung der Pfeile besser sichtbar gemacht worden. Die Zuverlässigkeit der Richtungen ist offensichtlich bei schwachen Magnetisierungen nicht schlechter als bei starken Magnetisierungen.

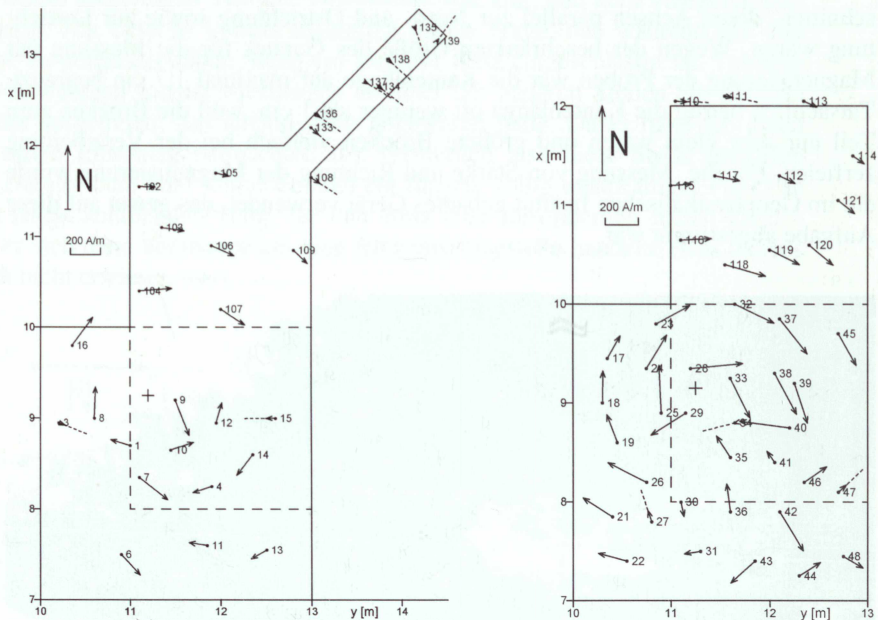


Abb. 9: Richtung und Stärke des horizontalen Anteils der remanenten Magnetisierung der Proben von Sohle 1 und Sohle 2

Bei den Sohlen 3 und vor allem 4 sind die Richtungen am besten konsistent (Abb. 10), während bei den Sohlen 5 und erst recht 6 Beträge und Richtungen stärker streuen (Abb. 11). Die Streuung der Richtungen der einzelnen Proben kann in einzelnen Fällen darauf zurückzuführen sein, daß während der Grabung einzelne Steine unabsichtlich gedreht worden sind. Wahrscheinlicher ist jedoch, daß sie echt und auf Inhomogenitäten des Materials zurückzuführen sind. Solche Probleme sind dem Geowissenschaftler geläufig. Mit detaillierten Untersuchungen können in vielen Fällen die Ursachen geklärt werden. Wegen des hohen Zeitaufwandes ist das oft - so auch hier - nicht durchführbar. Die wesentlichen Ergebnisse sind auch ohne solche Untersuchungen hinreichend klar zu erkennen.

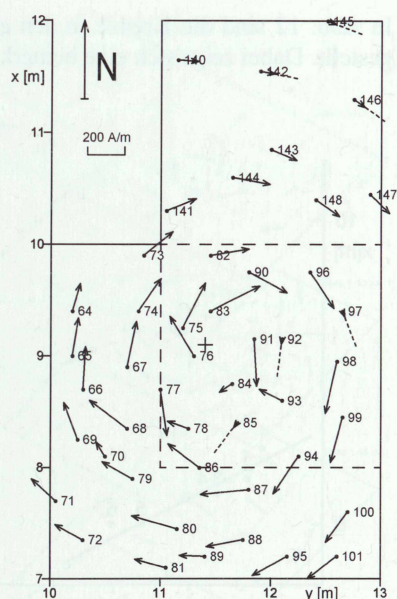
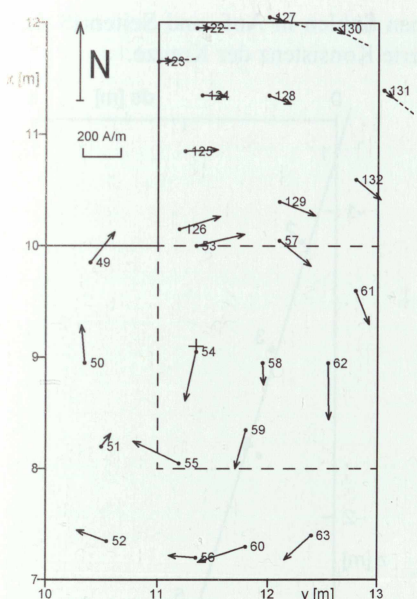


Abb. 10: Richtung und Stärke des horizontalen Anteils der remanenten Magnetisierung der Proben von Sohle 3 und Sohle 4

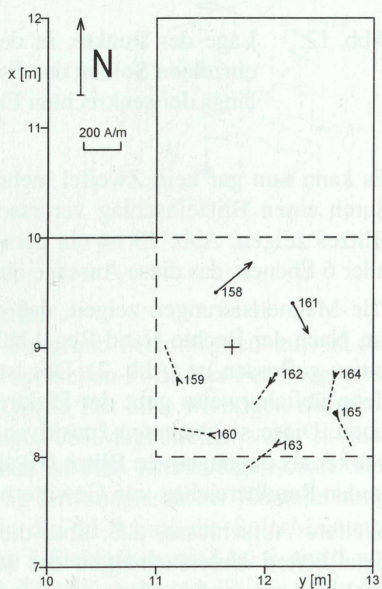
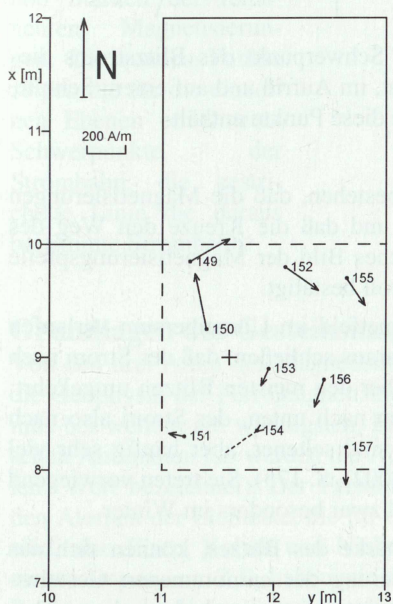


Abb. 11: Sohle 5 und Sohle 6

In Abb. 12 sind die Kreuze in den einzelnen Sohlen in Auf- und Seitenriß dargestellt. Dabei zeigt sich eine bemerkenswerte Konsistenz der Kreuze.

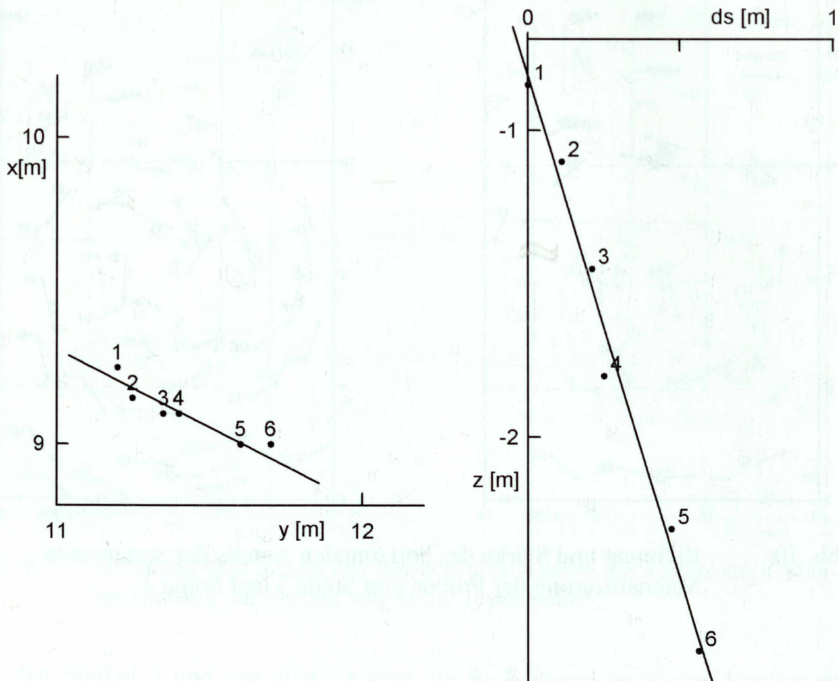


Abb. 12: Lage der Punkte, in denen der Schwerpunkt des Blitzstroms die einzelnen Sohlen durchstoßen hat, im Aufriß und auf einem Schnitt längs der senkrechten Ebene, die diese Punkte enthält

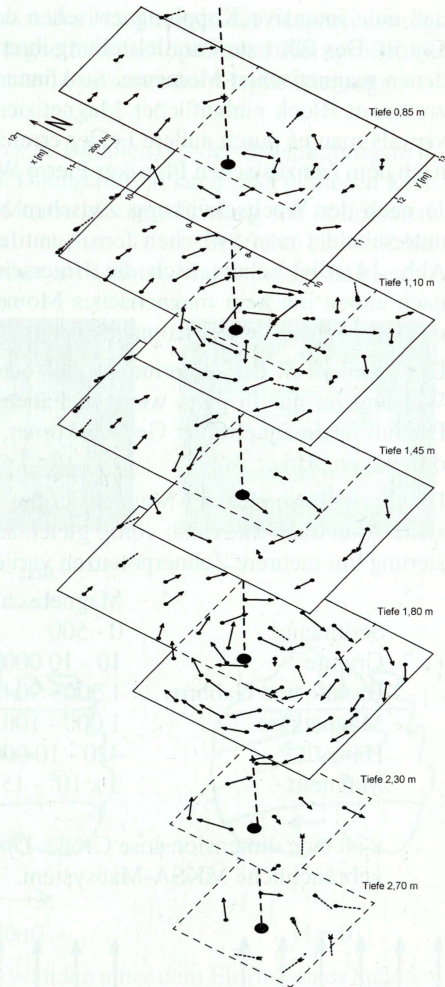
Es kann nun gar kein Zweifel mehr daran bestehen, daß die Magnetisierungen durch einen Blitzeinschlag verursacht sind und daß die Kreuze den Weg des Blitzes zeigen. Abb. 13 ist ein perspektivisches Bild der Magnetisierungspfeile aller 6 Ebenen, das diese Aussage eindrucksvoll bestätigt.

Die Magnetisierungen zeigen, daß das Magnetfeld im Uhrzeigersinn verlaufen ist. Nach der Rechte-Hand-Regel läßt sich daraus schließen, daß der Strom nach unten geflossen ist (Abb. 2). Das ist gegenüber den meisten Blitzen umgekehrt; denn üblicherweise geht der Elektronenstrom nach unten, der Strom also nach oben. Diese sogenannten "positiven Blitze" sind seltener, aber häufig sehr viel stärker als die negativen Blitze (HERMANT (2002), S. 175). Sie treten vorwiegend in den Randbereichen von Gewittern auf, und zwar besonders im Winter.

Weitere Aufschlüsse, z.B. über die Stromstärke des Blitzes, können sich aus detaillierten Untersuchungen der Magnetisierung der entnommenen Gesteinsproben ergeben. Die Magnetisierung von Gesteinen ist ein sehr komplexes Thema, über das an dieser Stelle einige Grundkenntnisse notwendig sind.

Abb. 13:

Perspektivisches Bild der in den einzelnen Ebenen beobachteten Richtungen und Stärken der remanenten Magnetisierungen. Die runden Punkte zeigen die für die einzelnen Ebenen errechneten Schwerpunkte der Strombahn, die gestrichelte Linie die daraus bestimmte Strombahn.



Grundlagen des Gesteinsmagnetismus

Von den drei Arten des Magnetismus Dia-, Para- und Ferromagnetismus ist für die Geophysik der Ferromagnetismus in der speziellen Form des Ferrimagnetismus bei weitem am wichtigsten. Er ist die Quelle fast aller wichtigen magnetischen Anomalien (so werden die Abweichungen des Magnetfeldes vom "normalen" Wert bezeichnet). Der Ferromagnetismus ist eine Kristalleigenschaft. Bei den Atomen der Elemente, die für die Bildung ferromagnetischer Kristalle nötig sind, also Eisen, Kobalt und Nickel, sind in der 3d-Schale die Spin-Momente nicht kompensiert. Z.B. haben wir beim Eisen 5 Elektronen mit Links- und 1 mit Rechtsspin. Im Kristallgitter von Eisen, Nickel und Kobalt sind die Abstände der Atome im Vergleich zu den Aufenthaltsräumen der 3d-Elektronen so günstig,

daß eine intensive Kopplung zwischen den 3d-Elektronen benachbarter Atome eintritt. Das führt zur Parallelstellung ihrer Spinrichtungen und der damit verbundenen magnetischen Momente. So können sich spontan Milliarden von Atomen zu einem Block einheitlicher Magnetisierung zusammenschließen, viel intensiver, als man es durch äußere Felder erreichen könnte. Solche Blöcke nennen wir nach dem französischen Physiker Pierre Weiss Weiss'sche Bezirke.

Je nach der Wechselwirkung zwischen benachbarten magnetischen Momenten unterscheidet man zwischen ferro-, antiferro- und ferrimagnetischen Kristallen. Abb. 14 zeigt schematisch die Unterschiede. Beim Antiferromagnetismus ist nach außen hin kein magnetisches Moment erkennbar, beim Ferrimagnetismus ist es gegenüber dem Ferromagnetismus stark verringert.

Der größte Teil der Gesteine ist dia- oder paramagnetisch. Deren magnetische Wirkung ist nur in ganz wenigen Fällen beobachtbar, weil normalerweise der Einfluß ferrimagnetischer Gesteinskörner, wenn sie vorhanden sind, um Größenordnungen stärker ist.

Die Variationsbreite der Magnetisierung variiert sehr stark von Gestein zu Gestein. Aber auch innerhalb völlig gleich aussehender Gesteine kann die Magnetisierung um mehrere Zehnerpotenzen variieren:

	Magnetische Suszeptibilitäten κ in 10^{-6}
Sedimente	0 - 500
Granite	10 - 10 000
Basalte und Gabbros	1 500 - 90 000
Magnetkies	1 000 - 100 000
Hämatit	420 - 10 000
Magnetit	3×10^6 - 15×10^6

κ ist eine dimensionslose Größe. Die o.g. Zahlenwerte gelten für das heute gebräuchliche MKSA-Maßsystem.

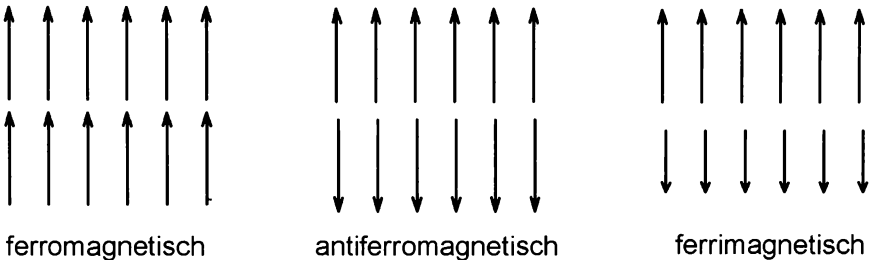


Abb. 14: Ferro-, Antiferro- und Ferrimagnetismus (nach SOFFEL, 1991)

Für ein bestimmtes Gestein ist die Variationsbreite sehr hoch. So überschneiden sich die Bereiche für viele Gesteine, man kann also aus der Magnetisierung allein nicht darauf schließen, um welches Gestein es sich handelt. Die letzte Zeile der

ste zeigt, warum das so ist: Magnetit ist der Hauptträger der Magnetisierung. Beimengungen von weniger als 1 % Magnetit in der optimalen Korngröße reichen aus, um die höchsten, bei Gesteinen beobachteten Magnetisierungen zu erzeugen.

Selbst in stark magnetischen Gesteinen (z.B. Basalten) ist der Bruchteil magnetischer Kristalle mit ca. 5% nur gering. In Dünnschliffen kann man in diesen Kristallen Weiss'sche Bezirke einheitlicher Magnetisierungsrichtung mit kolloidalem Magnetit unter dem Mikroskop sichtbar machen. Diese Bereiche einheitlicher Magnetisierungsrichtung würden auch ohne ein äußeres Magnetfeld existieren.

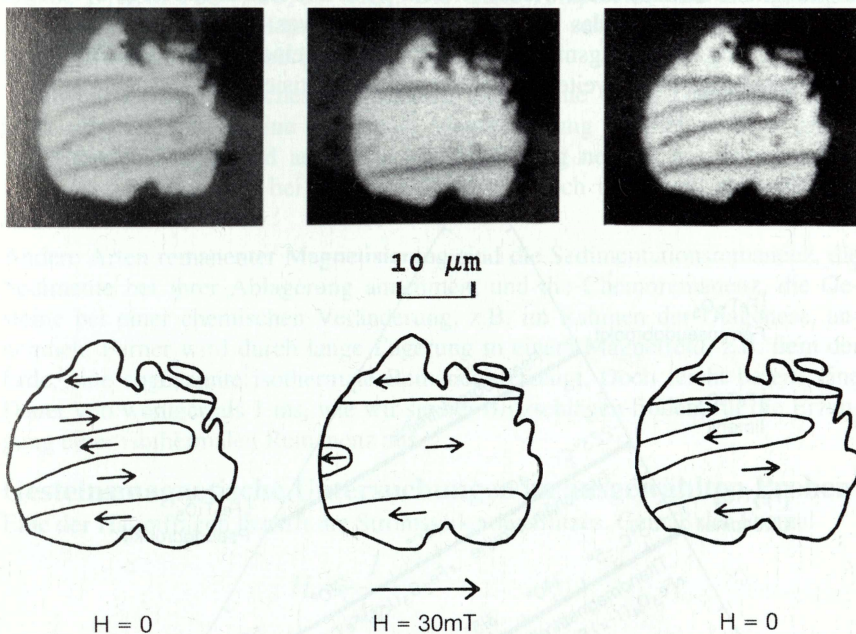


Abb. 15: Verschiebung von Bloch-Wänden unter dem Einfluß eines äußeren Magnetfeldes. In der oberen Reihe sind die Beobachtungen unter dem Mikroskop zu sehen, darunter eine - keineswegs eindeutige - Interpretation der Magnetisierungsrichtungen. (Nach SOFFEL, 1991)

Durch ein äußeres Magnetfeld kann man die Bereiche verändern. Das geschieht einerseits durch Wandern der "Blochschen Wände" zwischen benachbarten Weiss'schen Bezirken und andererseits durch Drehung der Magnetisierungsrichtung eines Bezirks. In Abb. 15 wird von links nach rechts der Zustand vor dem Anlegen eines Magnetfeldes von 30 Millitesla (das ist fast das Tausendfache der Feldstärke auf der Erde), während des Bestehens des Feldes und nach dem Abschalten dargestellt. Eine Verschiebung der Wände der Weiss'schen Bezirke verlangt wenig Energie. An Fehlstellen im Kristall können die Wände jedoch

hängenbleiben, und dann ist eine erhebliche Energiezufuhr z.B. durch eine Verstärkung des äußeren Magnetfeldes erforderlich, bis die Wand sich weiterbewegt.

Wenn die Magnetisierung beim Abschalten des Magnetfeldes wieder den vorherigen Betrag und die vorherige Richtung annimmt, spricht man von induzierter Magnetisierung. Der Anteil der Magnetisierung, der nach dem Abschalten verbleibt, heißt remanente Magnetisierung ("Remanenz"). Für diese Remanenz gibt es vielerlei Ursachen. Z.B. kann eine Blochsche Wand zwischen zwei Weiss'schen Bezirken an einer Fehlstelle im Kristall hängenbleiben, so daß der ursprüngliche Zustand nicht wieder erreicht wird. Die Remanenz ist in der Regel um so höher, je höher das vorherige Magnetfeld war. Bei großen Feldstärken wird eine sog. Sättigungsmagnetisierung erreicht, eine weitere Erhöhung der Feldstärke bringt keine weitere Erhöhung der Magnetisierung.

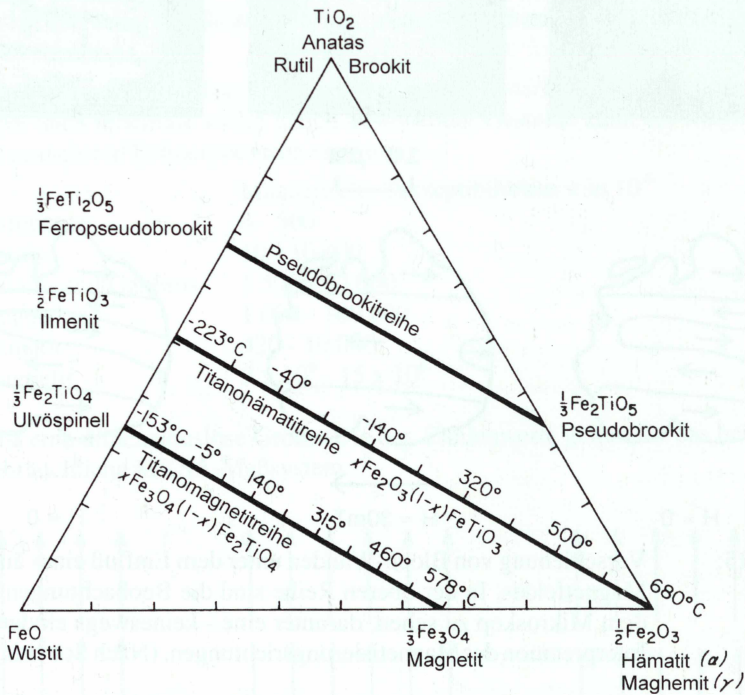


Abb. 16: Das ternäre System FeO, Fe₂O₃ und TiO₂ und die Abhängigkeit der Curie-Temperatur von Titanomagnetiten von ihrer Zusammensetzung

Für die Drehung der Magnetisierungsrichtung ist in der Regel eine deutlich höhere Feldstärke erforderlich als für eine Verschiebung der Bereichswände. Dieser Unterschied bedingt es, daß die remanente Magnetisierung besonders stabil ist, wenn die magnetischen Mineralkörner so klein sind, daß es sich vorwiegend um "Einbe-reichsteilchen" mit nur einem Weiss'schen Bezirk handelt. Sowohl bei noch kleineren als auch bei größeren Körnern ist die Magnetisierung weniger stabil.

Bei steigender Temperatur bleibt zwar noch die Parallelstellung der magnetischen Momente der Atome im Nahbereich erhalten, aber die Größe der Bereiche einheitlicher Magnetisierung und damit die makroskopisch sichtbare Magnetisierung nimmt ab. Bei der Curie-Temperatur, die naturgemäß für unterschiedliche Kristallgitter verschieden ist, verschwindet die ferrimagnetische Magnetisierung vollständig.

Hauptträger der Magnetisierung ist Magnetit, ein Mischkristall aus FeO und Fe₂O₃. Häufig ist ein Teil des FeO durch TiO ersetzt, man spricht deshalb genauer von Titanomagnetiten. Sie gehören ihrer Zusammensetzung nach in das ternäre System FeO - Fe₂O₃ - TiO₂. Die Curie-Temperatur und die sonstigen magnetischen Eigenschaften eines Minerals hängen sehr stark von der Lage in diesem Diagramm ab (Abb.16).

Wenn ein ferrimagnetisches Mineralkorn unter seine Curie-Temperatur abgekühlt wird, nimmt es eine remanente Magnetisierung parallel zu dem gerade herrschenden Magnetfeld an. Diese Magnetisierung nennen wir Thermoremanenz. Ihre Richtung ist bei manchen Gesteinen noch nach weit mehr als 100 Mill. Jahre erkennbar.

Andere Arten remanenter Magnetisierung sind die Sedimentationsremanenz, die Sedimente bei ihrer Ablagerung annehmen, und die Chemoremanenz, die Gesteine bei einer chemischen Veränderung, z.B. im Rahmen der Diagenese, annehmen. Ferner wird durch lange Lagerung in einem Magnetfeld, z.B. dem der Erde, eine sogenannte isothermale Remanenz erzeugt. Doch reicht bereits eine Dauer von weniger als 1 ms, wie wir sie bei Blitzschlägen finden, für die Erzeugung einer isothermalen Remanenz aus.

Gesteinsmagnetische Untersuchungen an ausgewählten Proben

Eine der Hauptfragen betrifft die Stromstärke des Blitzes. Gemäß der Formel

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

kann man über

$$I = H \cdot 2\pi r$$

die Stromstärke I berechnen, wenn man das Magnetfeld H im Abstand r von der Blitzlinie kennt. H kann man aus der remanenten Magnetisierung berechnen, die Proben im Abstand r von der Blitzlinie haben, wenn man die Remanenz als Funktion von H kennt. Dazu ist es notwendig, bei ausgewählten Proben zunächst die Blitzschlagremanenz zu beseitigen und dann die Proben mit einem allmählich wachsenden Magnetfeld aufzumagnetisieren.

Zur Beseitigung der Blitzschlagsremanenz habe ich nacheinander zahlreiche Proben in eine große Spule gelegt, durch die ein starker 50-Hz-Wechselstrom geschickt wurde, der innerhalb einiger Sekunden auf Null heruntergeregt wurde. Obwohl die Feldstärken in der Spule höher waren als die Blitzfeldstärken, nahm die Blitzmagnetisierung zwar durchaus bis auf ein Hundertstel ab, aber

ihre Richtung blieb erhalten. Das ist erstaunlich, aber nach dem oben über die Remanenz gesagten nicht unverständlich.

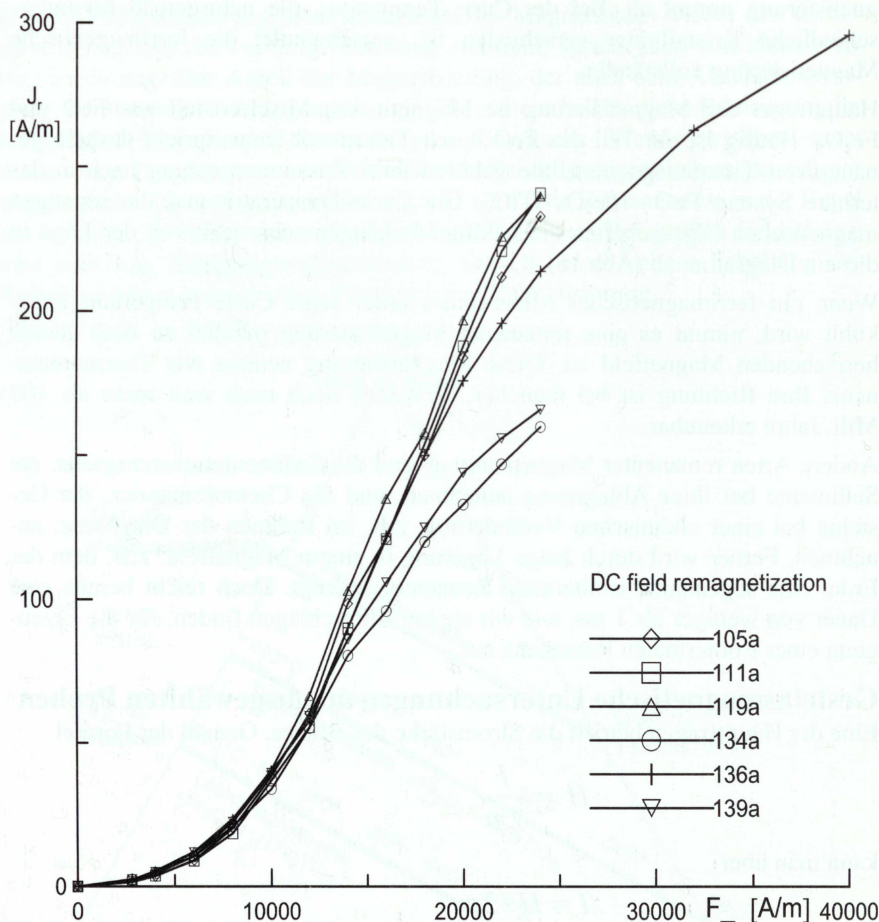


Abb. 17: Aufmagnetisierung von Proben mit einem Gleichfeld, um damit die Wirkung eines Blitzschlags zu simulieren

Einige der Proben habe ich nach der Abmagnetisierung wieder mit einem Gleichfeld aufmagnetisiert, damit also ein Blitzfeld simuliert. Nach dem Abschalten des Feldes habe ich die verbliebene Remanenz gemessen (Abb. 17). Diese nimmt bei kleinen Feldstärken nur wenig zu, bei größeren dann stärker, um schließlich einem Maximalwert zuzustreben.

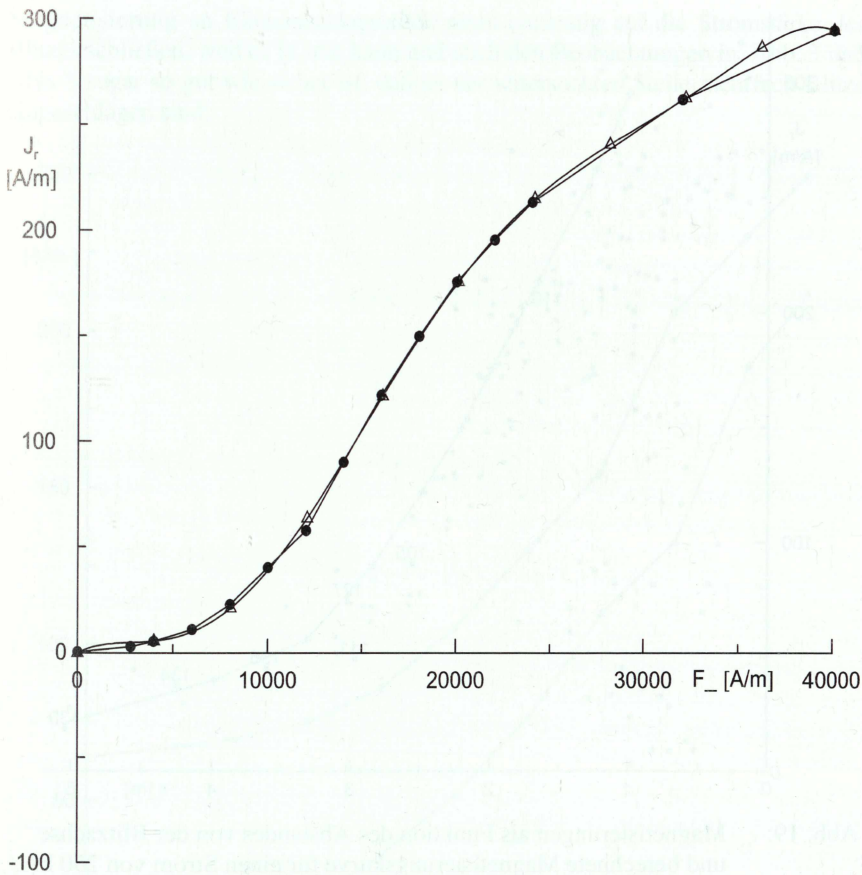


Abb. 18: Aufmagnetisierungskurve der Probe 136a (Kreise) und Näherungsfunktion (Dreiecke) zu dieser Kurve

Zur Kurve der in der Mitte liegenden Probe 136a habe ich eine Näherungsfunktion berechnet (Abb. 18). Diese Kurve zeigt, wie die Probe in Abhängigkeit von der Entfernung von der Blitzachse bei einer bestimmten Stromstärke des Blitzes magnetisiert werden würde. Z.B. wäre bei einem Strom von 100 000 A das Feld in 1 m Entfernung $100\,000\text{ A}/2\pi \approx 15\,000\text{ A/m}$. Das ergäbe eine remanente Magnetisierung von 120 A/m. Um nun den wahrscheinlichsten Strom ermitteln zu können, habe ich für alle Proben die Magnetisierung als Funktion des Abstandes von der durch Kreuzchen markierten Blitzachse aufgetragen und dann über die Kurve von Probe 136a aus den Remanenzen die dafür notwendige Stromstärke berechnet (Abb. 19).

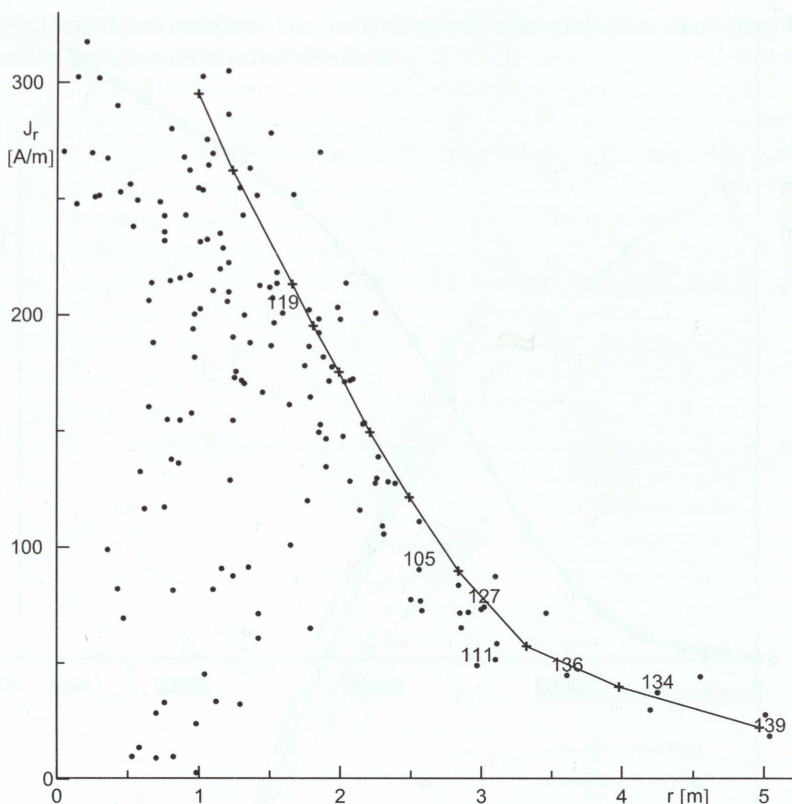


Abb. 19: Magnetisierungen als Funktion des Abstandes von der Blitzachse und berechnete Magnetisierungskurve für einen Strom von 250 kA; die Nummern zeigen die speziell untersuchten Proben.

Die Abschätzung der wahrscheinlichsten Stromstärke basiert auf sieben detailliert untersuchten Proben, zu denen in Abb. 19 die Probennummern eingetragen sind. Viele der gemessen an ihrer Entfernung von der Blitzbahn zu schwach magnetisierten Proben sind stark zersetzt. Die Stromstärke für die Kurve in Abb. 19 beträgt 250 000 A. Das ist weit mehr als die 100 000 A, die im allgemeinen für Blitze genannt werden. Laut HERMANT (2002) gibt es durchaus "Superblitze" mit Stromstärken von 150 000 - 300 000 A. Diese sind aber selten.

Ich hatte deshalb den Verdacht, daß bei mehreren Blitzschlägen mit langen Zeiträumen dazwischen die Magnetisierungen der Einzelblitze sich addieren könnten. So habe ich einige vom Blitz magnetisierte Gesteinsproben ohne vorherige Abmagnetisierung einem magnetischen Gleichfeld ausgesetzt (Abb. 20). Dabei stellte ich fest, daß die neue Magnetisierung sich größtenteils zu der alten dazuaddiert. Wenn also nach einem Blitz von 100 000 A ein zweiter mit ebenfalls 100 000 A an derselben Stelle einschlägt, sieht es so aus, als ob ein Blitz mit 150 000 - 200 000 A eingeschlagen sei. Man kann somit aus Messungen der

Magnetisierung an Blitzschlagstellen nicht eindeutig auf die Stromstärke des Blitzes schließen, weil es ja sein kann und nach den Beobachtungen in Abb. 3 und Abb. 5 sogar so gut wie sicher ist, daß an der untersuchten Stelle mehrfach Blitze eingeschlagen sind.

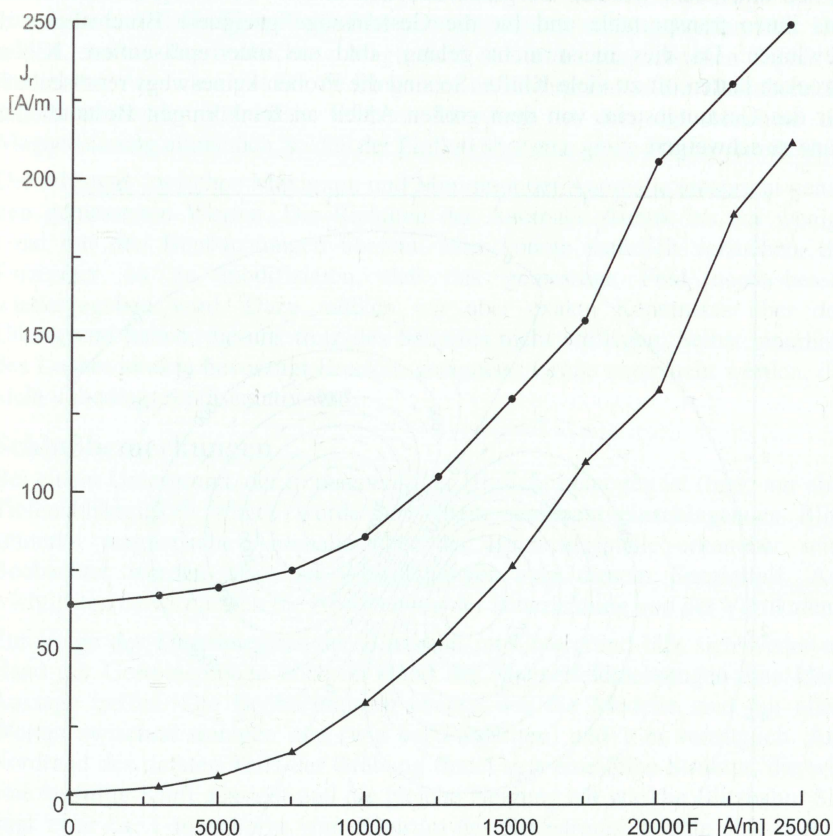


Abb. 20: Gleichfeldaufmagnetisierung einer durch Blitzschlag magnetisierten Probe vor (Kreise) und nach (Dreiecke) Wechselfeldabmagnetisierung

Modellrechnungen

Nun geht es noch um die Frage, ob die beobachtete magnetische Anomalie über der Einschlagstelle durch die gemessenen Magnetisierungen erklärt werden kann. Dazu habe ich ein Computerprogramm geschrieben, in das die Magnetisierungen als Funktion der Entfernung von der Blitzachse und der Tiefe eingegeben werden. Außerdem lassen sich verschiedene andere Parameter variieren, um zusätzliche Informationen über den Blitz zu bekommen. Die wichtigsten in Abb. 21 verwendeten Parameter sind: Blitzstromstärke 250 000 A, Richtung der Blitzebene NW - SE, Neigung des Blitzes gegenüber der Vertikalen 10° . Das

erhaltene Feld stimmt gut mit dem gemessenen Feld (Abb. 3 und Abb. 5) überein, die Amplitude liegt zwischen den beiden Vermessungen. Daß die Amplitude so gut mit den Beobachtungen übereinstimmt, ist eigentlich überraschend. Bei den Probenmessungen sind ja bevorzugt Brocken geeigneter Größe untersucht worden. Zu große Brocken mußten zerschlagen werden, um aus ihnen transportable und für die Gesteinssäge geeignete Bruchstücke zu gewinnen. Da dies meist nicht gelang, sind sie unterrepräsentiert. Kleine Brocken hatten oft zu viele Klüfte. So sind die Proben keineswegs repräsentativ für das Gesamtgestein, von dem großen Anteil an feinkörnigen Bestandteilen ganz zu schweigen.

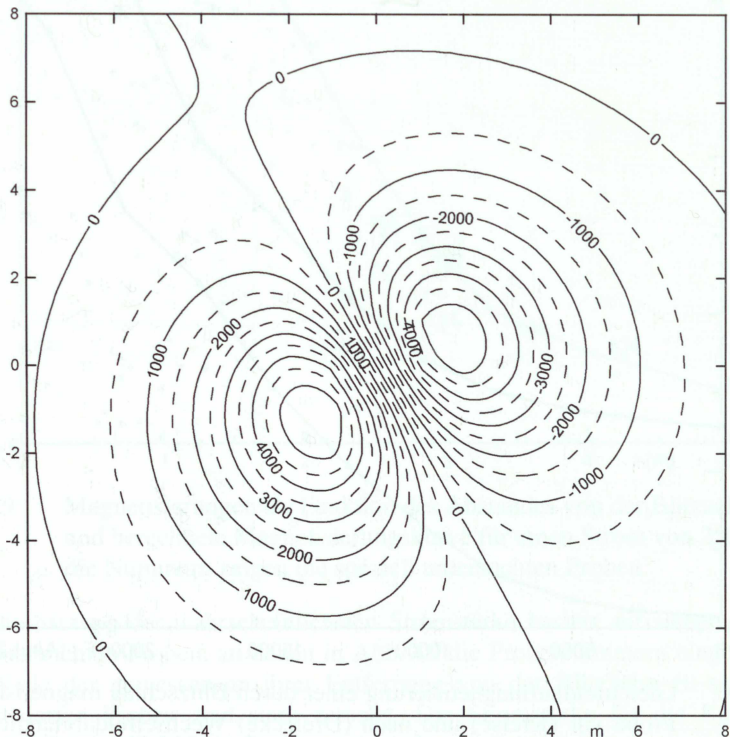


Abb. 21: Berechnetes Magnetfeld für Anomalie I mit folgenden Parametern:
 Blitzstromstärke 250 000 A, Richtung der Blitzebene NW - SE,
 Neigung des Blitzes gegenüber der Vertikalen 10°

Eine der großen Überraschungen war für mich die Form der Anomalie, die ich eigentlich so nicht erwartet hatten. Beim Nachdenken über die besten Berechnungsmethoden und die geeigneten Näherungsverfahren, damals (1963) noch ohne Computer, zeigte sich, daß ein senkrechter Blitzeinschlag in einem gleichmäßig magnetisierbaren waagerechten Boden überhaupt kein Magnetfeld liefern würde. Ein Torus aus gleichmäßig längs der Torusachse magnetisiertem Material liefert nämlich in sich geschlossene Magnetfeldlinien, die nicht nach

außen gehen. Das erscheint sehr überraschend. Aber man kann sich an einen Schulversuch erinnern: Wenn man zwei identische Hufeisenmagnete mit den ungleichnamigen Polen aneinanderlegt, ziehen sie eine Stecknadel nicht mehr an. Bei einem schräg einschlagenden Blitz fehlt bei den Schichten, die in der Nähe der Oberfläche sind, der Teil des Torus, der oberhalb der Erdoberfläche liegen müßte. Nur diese unvollständigen Ringe führen zu einem nach außen gehenden Feld. Das erklärt, warum das beobachtete Magnetfeld dem eines magnetischen Dipols so ähnlich ist. Ähnliches gilt für die Ringe, die im Untergrund in die Tiefenbereiche mit abnehmender Remanenz reichen. Allerdings ist dort die Abnahme der Magnetisierung allmählich, so daß der Einfluß über eine große Fläche verteilt ist.

Der Abstand zwischen Maximum und Minimum der Anomalie entspricht genau den gemessenen Werten. Die Richtung der Anomalie stimmt bis auf wenige Grad mit den Beobachtungen überein. Man könnte natürlich versuchen, die Parameter so zu modifizieren, daß das gemessene Feld noch besser wiedergegeben wird. Dazu müßten wir aber exakte Kenntnisse über den Untergrund haben, die uns trotz des Schurfes nicht vorliegen. Selbst innerhalb des Loches sind ja bevorzugt Brocken geeigneter Größe untersucht worden, die nicht unbedingt repräsentativ sind.

Schlußbemerkungen

Bei einem Untergrund, der in magnetischer Hinsicht homogen ist (bzw. nur eine Tiefenabhängigkeit zeigt), würde bei einem senkrecht einschlagenden Blitz keinerlei magnetische Anomalie über der Blitzschlagstelle erkennbar sein. Beobachtet werden also nur Abweichungen von diesem Spezialfall. Am wichtigsten ist vermutlich die Abweichung der Blitzrichtung von der Vertikalen.

Zur Frage des Durchmessers der Blitzbahn im Untergrund läßt sich weder an Hand der Gesteinsproben noch an Hand der Magnetfeldmessungen eine klare Aussage treffen. Die Beobachtungen ebenso wie die Modelle sind mit allen Werten zwischen wenigen mm (wie bei Fulguriten) und 1 m verträglich. Am Nordrand des tiefsten Teils der Grabung findet sich eine feine Struktur, die wie eine verfüllte Kluft aussieht und die gleiche Neigung hat wie die Blitzbahn. Sie liegt zwar ca. 1 m entfernt vom Zentrum des Blitzstroms, könnte aber darauf hindeuten, daß verfüllte Klüfte den Blitzstrom geführt haben.

Der hier von zwei Blitzschlägen getroffene Ort fällt an der Erdoberfläche in keiner Weise auf. Er liegt mitten in einem Hochwald. Die in ca. 10 m Entfernung stehenden nächsten Buchen zeigen keinerlei Blitzeinwirkung. Auch die anderen vermutlichen Blitzschlagstellen auf dem Backenberg fallen durch nichts auf. Es muß also Unterschiede im Untergrund geben, die der Blitz erkennt. Vermutlich ist die Leitfähigkeit des Untergrundes dabei entscheidend wichtig. Leider konnten entsprechende Messungen damals wegen technischer Schwierigkeiten nicht durchgeführt werden.

Da es schwer vorstellbar ist, daß ein von oben kommender Blitz solche lateralen Unterschiede ganz präzise erkennt, halte ich es für wahrscheinlich, daß es sich in der Nomenklatur von HERMANT (2002) um einen positiv aufwärts gerichteten

Erdblitz behandelt hat. Laut HERMANT (2002) sind solche Blitze ziemlich selten und treten meist an exponierten Stellen auf.

Blitzeinschlagstellen dieser Art sind offenbar sehr schwer zu finden und vielleicht auch selten. Jedenfalls sind mir keine vergleichbaren Untersuchungen bekannt.

Bei diesen Untersuchungen habe ich vielerlei Unterstützung durch die Herren Prof. Bartels, Dr. Meitzner, Dr. Pucher, Prof. Siebert, Prof. Untiedt und Dr. Zech erhalten.

Literatur

- BOLTER, E. (1961): Über Zersetzungsprodukte von Olivin-Feldspatbasalten.- Beitr. Miner. Petrogr. **8**: 111-140.
- DWYER, J.R. (2005): Vom Blitz getroffen.- Spektrum d. Wiss. **05(11)**: 38-46.
- HERMANT, A. (2002): Gewitter: Faszination eines Phänomens.- 254 S., Delius Klasing.
- HUMBOLDT, A. VON (1797): Über die merkwürdige magnetische Polarität einer Gebirgskuppe von Serpentinsteine.- Gren's neues J. Physik **4**: 136.
- MEITZNER, W. (1962): Magnetische Untersuchungen am Backenberg bei Güntersen.- Z. f. Geophysik **28**: 137-154.
- MEYER, K.D. (2000): Blitzröhrenfragmente bei Wielen, Kreis Grafschaft Bentheim.- Ber. Naturhist. Ges. Hannover **142**: 169-174.
- OVERHOFF, J. (2006): Benjamin Franklin, Erfinder, Freigeist, Staatenlenker.- 314 S., Klett-Cotta.
- POCKELS, F. (1898): Ein Versuch, die bei Blitzschlägen erreichte maximale Stromstärke zu schätzen.- Meteorol. Zeitschrift **15**, 41-46.
- PORADA, H. & WITTIG, R. (1975): Geologische Wirkung von Blitzeinschlägen.- Natur und Museum **105**: 236-244.
- RAKOV, V.A. & UMAN, M.A. (2003) Lightning – Physics and Effects.- 696 S., Cambridge University Press
- SOFFEL, H.C. (1991): Paläomagnetismus und Archäomagnetismus.- 276 S., Springer

Anschrift des Verfassers:
Hans Albert Roeser
Paula-Nordhoff-Straße 3a
30629 Hannover

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte der Naturhistorischen Gesellschaft Hannover](#)

Jahr/Year: 2006

Band/Volume: [148](#)

Autor(en)/Author(s): Roeser Hans Albert

Artikel/Article: [Geomagnetische Beobachtungen an Blitzeinschlagstellen
25-50](#)