



Mitt. naturwiss. Ver. Steiermark	Band 135	S. 13–24	Graz 2006
----------------------------------	----------	----------	-----------

Umweltmagnetik im Raum Trofaiach bis Eisenerz (steirische Eisenstrasse)

Von Sigrid HEMETSBERGER¹ & Robert SCHOLGER¹
Mit 5 Abbildungen und einer Tabelle

Angenommen am 25. November 2005

Summary: Environmental Magnetism from Trofaiach to Eisenerz. – Measurements of the magnetic susceptibility of soils are used since many years for spatial delimitation of heavy-metal anomalies and, when measured in depth profiles, to distinguish between anthropogenic or lithogenic cause of the anomaly. A magnetic susceptibility anomaly, found in former investigations was investigated in the area Trofaiach-Eisenerz.

The anomaly is divided into three parts, one of them in Gößgraben with low amplitude, one in the area south of Präbichl with a peak in Vordernberg and high amplitude, and the third in the area north of Präbichl. Depth profiles indicated the anomaly in Gößgraben as a geogenic anomaly caused by volcanic rocks. The other two anomalies are anthropogenically induced. The anomaly south of Präbichl is related to historical heavy industry of Vordernberg. The anomaly north of Präbichl is also related to the former heavy industry. The centre of the anomaly was found near to a slagheap near Eisenerz.

A certain magnetic phase exists in all samples. This phase is characterized by low coercivity and easy magnetic saturation, both indicating technogenically derived iron oxides. There is no clear delimitation of the anomaly with altitude. The margins of the anomaly are defined by a concentration of the magnetic phase, which cannot be detected by the susceptibility measurements.

Zusammenfassung: Die Messung der magnetischen Suszeptibilität wird seit einigen Jahren intensiv zur Untersuchung der Schwermetallbelastung von Böden herangezogen, da mit dieser Methode sehr rasch flächenhafte Anomalien abgegrenzt werden können und man anhand der Tiefenverteilung der magnetischen Suszeptibilität anthropogen belastete Böden von geogen bedingten Anomalien unterscheiden kann. Ziel dieser Arbeit war es, eine in früheren Arbeiten erkannte Suszeptibilitätsanomalie im Gebiet von Trofaiach bis zum Leopoldsteiner See genau zu untersuchen.

Die Untersuchung der Tiefenverteilung der Suszeptibilität an bestimmten Schurfstandorten zeigt für die Anomalie im Gößgraben eine geogene Beeinflussung, die beiden Anomalien bei Vordernberg und Eisenerz erwiesen sich als eindeutig anthropogen verursacht. Die Anomalie bei Vordernberg südlich des Präbichl steht eng in Zusammenhang mit der historischen Schwerindustrie. In unmittelbarer Nähe zu drei ehemaligen Radwerkstandorten tritt das Maximum der Anomalie in Form einer an dieser Stelle 1 m mächtigen Rußlage auf. Die Anomalie in Eisenerz steht ebenfalls mit der Eisenindustrie in Zusammenhang, wobei in Eisenerz der Peak der Anomalie in der Nähe der Schlackenhalde der Schwerindustrie auftritt.

Die mineralmagnetischen Untersuchungsmethoden zeigen, dass in allen Proben die selbe anthropogene Phase auftrat. Diese Phase zeichnet sich durch eine niedrige Koerzitivität und eine rasche magnetische Sättigung aus, beides sind Hinweise auf Eisenoxide technogener Herkunft. Die Anomalien konnten anhand von atmosphärischen Sperrschichten nicht abgegrenzt werden. Die Begrenzung der Anomalie erfolgte durch die Abnahme der Konzentration der technogenen Phasen auf ein Niveau, dass aufgrund des Messbereichs bei der Suszeptibilitätskartierung nicht mehr erfasst werden konnte.

1. Einleitung

Umweltmagnetik im weiteren Sinn beschäftigt sich mit den Eigenschaften von magnetischen Mineralen als Indikator für Paläoklima, Sediment-Liefergebiet, sowie anthropogen bedingte Umweltverschmutzung. Mineralmagnetische Untersuchungen sind

¹ Montanuniversität Leoben; Department für Angewandte Geowissenschaften und Geophysik, Lehrstuhl für Geophysik, Paläomagnetiklabor Gams, Gams 45, 8130 Frohnleiten, E-Mail: sigrid.hemetsberger@stud.unileoben.ac.at; scholger@unileoben.ac.at





sehr sensibel, schnell messbar und meist nicht-destruktiv. Die Mineralmagnetik umfasst unter anderem Temperatur- und Feldabhängigkeiten von verschiedenen Arten induzierter und remanenter Magnetisierung. Mithilfe dieser Analysen kann man magnetische Minerale erkennen sowie deren Konzentration und Korngröße bestimmen (DEKKERS 1997). In den letzten Jahren wurden verstärkt geophysikalische und petrophysikalische Messmethoden für die Erkundung von Umweltbelastungen eingesetzt, da sie eine kostengünstige Ergänzung zu chemischen Analysen darstellen (HANESCH & SCHOLGER 2002). Viele Schwermetall-Emissionen sind hochmagnetische Partikel, die mit Hilfe der magnetischen Suszeptibilität (Magnetisierbarkeit) und anderen petrophysikalischen Parametern rasch und eindeutig nachgewiesen werden können. Die Basis für diese Untersuchung bilden Geländemessungen in denen Bereiche mit erhöhter Suszeptibilität in Bezug auf die durchschnittliche Suszeptibilität der Umgebung erkannt und begrenzt werden. Diese Bereiche werden als Suszeptibilitätsanomalien bezeichnet, wobei in detaillierten Untersuchungen geklärt wird, ob diese Anomalien geogene bzw. anthropogene Ursachen haben.

Im Rahmen einer Pilotstudie in Zusammenarbeit mit dem Landwirtschaftlichen Versuchszentrum Steiermark wurden ortsspezifische Zusammenhänge zwischen Schwermetallgehalten und magnetischer Suszeptibilität von Böden in der Steiermark gefunden. Die Untersuchung von Bodenproben der Bodenzustandsinventuren der Bundesländer Steiermark, Niederösterreich und Burgenland ergaben eine Reihe von potentiellen Untersuchungsflächen, in denen die Immissionsbelastung durch eine magnetische Suszeptibilitätskartierung flächig erkundet werden kann (HANESCH & SCHOLGER 2002). Praktisch alle Anomalien der Suszeptibilität sind gleichzeitig auch Bereiche mit erhöhten Schwermetallgehalten (z. B. Cu, Pb und Zn im Ennstal; Pb und Hg in Leoben). Die Differenz der Suszeptibilität zwischen Oberboden (0 bis 20 cm) und Unterboden ist ein Indikator für die Herkunft der magnetischen Phasen. Hohe Suszeptibilität bei einer gleichzeitigen signifikanten Anreicherung im Unterboden zeigt geogene Anomalien im oberen Ennstal, im Murauer Paläozoikum, sowie im Wechselgebiet an. Erhöhte Suszeptibilität bei gleichzeitig signifikanter Anreicherung im Oberboden weist auf den anthropogenen Eintrag von magnetischen Phasen hin. Der anthropogene Eintrag umfasst dabei sowohl technogene magnetische Partikel aus industriellen Prozessen und Verkehrsemissionen, als auch magnetische Minerale, die zum Beispiel in Bergbaugebieten durch Staubverfrachtung infolge der Abbautätigkeit im Boden angereichert werden können. Die höchsten Suszeptibilitätswerte treten in den Industrieregionen Erzberg-Vordernberg, Leoben, Fohnsdorf, Voitsberg und Weiz auf (HANESCH & SCHOLGER 2002).

Bei der Untersuchung von steirischen Böden zeigte sich eine durch zwei Beprobungspunkte der Bodenzustandsinventur des Landes Steiermark erfasste Anomalie im Raum Vordernberg – Eisenerz. In dieser Arbeit soll diese bekannten Anomalie näher untersucht werden. Das Messgebiet liegt zwischen Trofaiach und dem Leopoldsteiner See. Durch eine Profilkartierung im Gelände sollen Anomaliebereiche begrenzt werden sowie die Beeinträchtigung der Nachbartäler und alpiner Nutzflächen geklärt werden. Durch Untersuchung der vertikalen Verteilung der magnetischen Suszeptibilität an ausgesuchten Schurfpunkten sollen für den an der Oberfläche gemessenen Suszeptibilitätswert geogene von anthropogenen Ursachen unterschieden werden.

1.1 Geogene Anomalien

Die Suszeptibilität der Gesteine wird im wesentlichen von den gesteinsbildenden Mineralen bestimmt. Minerale mit hohen Suszeptibilitäten (z. B. Magnetit) können dabei die magnetische Charakteristik der Gesteine stark beeinflussen, auch wenn sie nur in Spuren vorhanden sind. Die spezifische magnetische Suszeptibilität (χ) in Phylliten und Tonschiefern, wie sie im Altpaläozoischen Phyllit, im Radschiefer und in den Wer-





fener Schiefen des Untersuchungsgebietes auftreten, liegt in Größenordnungen von $10\text{--}100 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ (THOMPSON & OLDFIELD 1986). Reiner Kalk oder Dolomit zeigen diamagnetisches Verhalten. Durch den Einbau von paramagnetischen oder ferromagnetischen Mineralen (z. B. Siderit, Hämatit, Magnetit) kann die negative magnetische Suszeptibilität überprägt werden. Die Färbung der Kalke kann Hinweise auf das Auftreten von magnetischen Mineralen geben, z. B. ist die Rotfärbung von Kalk ein Indiz für die Existenz von Hämatit (z. B. Rotfärbung des Polsterkalks). Böden die über Karbonaten entwickelt sind, zeigen daher nur dann erhöhte Suszeptibilitätswerte, wenn Minerale wie Hämatit, Magnetit oder Pyrit in höheren Konzentrationen vorhanden sind.

Die Siderit- und Ankeritvererzungen, die am Erzberg abgebaut werden, sind antiferromagnetisch. Sie zeigen aber bei Raumtemperatur paramagnetisches Verhalten (DEKKERS 1997) und haben deshalb geringe Bedeutung bei der Suszeptibilitätskartierung. Magmatische Gesteine zeigen im Allgemeinen hohe Suszeptibilitätswerte (Basalte $\chi = 1800 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, THOMPSON & OLDFIELD 1986). Bei Gesteinen mit hohem Quarzanteil, wie dem Blasseneckporphyroid, ist die Suszeptibilität durch den diamagnetischen Einfluss von Quarz entsprechend verringert (Granite $\chi = 200 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, THOMPSON & OLDFIELD 1986). HANESCH & SCHOLGER (2005) zeigen, dass die spezifische magnetische Suszeptibilität für unbelastete Böden in Österreich je nach Bodentyp zwischen $5\text{--}20 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ (Feuchtschwarzerde) und $50\text{--}90 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ (Tschernosem) liegt, wobei sowohl das unterliegende Gestein als auch der Bodentyp Einfluss nehmen. Braunerde zeigt intermediäre Werte ($20\text{--}60 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$).

Charakteristisch für geogene Anomalien ist eine Zunahme der magnetischen Suszeptibilität mit der Tiefe, da durch die Anreicherung der oberen Bodenhorizonte mit organischer Substanz die Konzentration der magnetischen Minerale im Oberboden geringer ist als im unterliegenden Gestein.

1.2 Anthropogene Anomalien

Anthropogene magnetische Anomalien werden durch im Zusammenhang mit Verbrennungsprozessen stehenden partikulären Eintrag verursacht. (KAPICKA & al. 1999; QUEROL & al. 1993; HANESCH & al. 2003A; MATZKA & MAHER 1999; MORENO & al. 2003). Anthropogene Anomalien zeigen bei Profilen eine stark erhöhte magnetische Suszeptibilität im Oberboden. Die magnetische Suszeptibilitätskartierung kann zur Erkundung von Industrieemissionen eingesetzt werden, da viele technogene Partikel, z. B. Flugaschen von Kohlekraftwerken (KAPICKA & al. 2001), Emissionen der Schwerindustrie (LECOANET & al. 2001), aber auch Autoemissionen (HOFFMANN & al. 1999) hochmagnetisch sind. Der wesentliche Vorteil der Methode ist die Möglichkeit der raschen kostengünstigen Verdichtung von Informationen über Umweltbelastungen. In den vergangenen Jahren wurden an der Montanuniversität Leoben zahlreiche Untersuchungen mit dieser Methode an Böden und Blättern in Kombination mit chemischen Analysen durchgeführt (BOYKO & al. 2004; HANESCH & SCHOLGER 2002; HANESCH & al. 2003A; HANESCH & al. 2003B). Dabei konnten statistisch signifikante positive Korrelationen der magnetischen Suszeptibilität mit den Schwermetallgehalten von Böden (z. B. Cr, Pb, Zn und Cu) festgestellt werden (BITYUKOVA, & al. 1999; HANESCH & SCHOLGER 2002).

1.3 Die steirische Eisenstrasse

Die historische Entwicklung der steirischen Eisenstraße ist insbesondere beim Einsatz magnetischer Methoden wichtig, da sie auf die Interpretation der Messergebnisse großen Einfluss hat. Entlang der steirischen Eisenstraße wurde seit dem 11. Jahrhundert Erz abgebaut. Das gewonnene Erz wurde dann in den 14 Radwerken Vordernbergs und



den 19 Radwerken von Eisenerz verhüttet und zu Eisen weiterverarbeitet. Seit dem Mittelalter standen die 14 Schmelzöfen von Vordernberg in Betrieb. Ursprünglich waren sie als einfache Rennöfen ausgeführt, im 13. Jahrhundert mussten sie den wasserradbetriebenen Stücköfen, die entlang des Vordernberger Baches angesiedelt waren, weichen. In diesen Schmelzöfen wurde direkt nach der Verarbeitung Schmiedbares aus dem Ofen gezogen. Großer Holzkohleverbrauch und geringe Eisenausbringung führten in Vordernberg zur Umstellung auf Floßöfen. Ein Floßofen erzeugte unter anderen metallurgischen Voraussetzungen Roheisen, das erst durch das „Frischen“ in Stahl umgewandelt und so schmiedbar wurde (KÖSTLER & SLESAK 1986). Nach langer und wechselvoller wirtschaftlicher Geschichte wurden in den Zwanziger Jahren des 20. Jahrhunderts die letzten

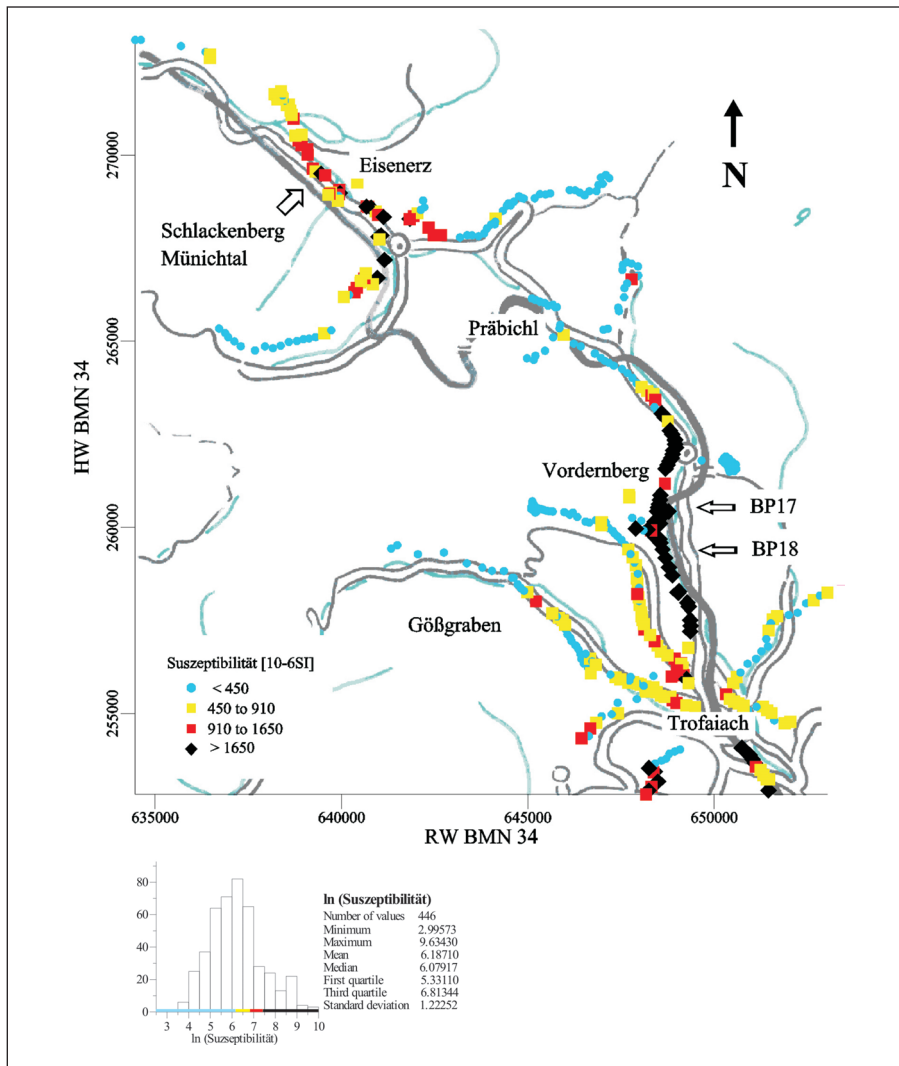


Abb. 1: Verteilungskarte der magnetischen Suszeptibilität mit statistischer Auswertung der gemessenen Suszeptibilitätswerte zur Bestimmung der Klassen.
Distribution of the magnetic susceptibility in the study area with a statistic evaluation of the measured susceptibility values used in the classification.



beiden Radwerke geschlossen. In Eisenerz wurden die 19 Radwerke um 1760 auf Floßofenbetrieb umgestellt. 1830 waren nur noch 3 der Hochöfen in Betrieb. 1946 wurde die moderne Kokshochofenanlage in Eisenerz abgerissen. An die Eisenproduktion in dieser modernen Anlage erinnert lediglich ein beachtlicher Berg aus Hochhofenschlacke in Münichtal bei Eisenerz.

Wie aus einer Aufzeichnung von Kajetan Leitner aus dem Jahre 1793 hervorgeht, war durch die vielen Radwerke die Luftverschmutzung groß: „Unter den Häusern fand ich nur die von ein paar Radwerks-Inhabern geräumig und sauber, alle übrigen (...) klein und unansehnlich. Überdies sind die meisten von Rauch und Kohlenstaub geschwärzt;“ (SPERL, 1984). Neben der Belastung aus der Luft ist auch der freizügige Umgang mit dem Wasser des Vordernberger Baches bemerkenswert. Die Schlacke, die bei der Herstellung des Eisens anfiel, wurde direkt in den Vordernberger Bach geleitet, der dann für den Abtransport sorgte.

2. Methodik

Als Verhältnis der induzierten Magnetisierung in einer Probe zur Feldstärke des Erregerfeldes (schwaches, hochfrequentes magnetisches Wechselfeld eines Suszeptibilitäts-Messgerätes) ist die Volumenssuszeptibilität im internationalen Maßeinheitensystem (SI) eine dimensionslose Größe. Die Magnetisierbarkeit von Gesteinen ist zur Menge und Korngröße der am Gesteinsaufbau beteiligten, magnetischen Mineralphasen direkt proportional. Im Allgemeinen kommt Magnetit aufgrund der hohen mineral-spezifischen Suszeptibilität die größte Bedeutung zu. Die magnetische Suszeptibilität kann dann als grobes Maß für den Magnetitanteil von Gesteinen herangezogen werden (THOMPSON & OLDFIELD 1986). Wird die magnetische Suszeptibilität sowohl bei niedriger als auch bei hoher Frequenz gemessen, kann die Frequenzabhängigkeit $f_d(\%)$ bestimmt werden. Die Frequenzabhängigkeit kann in Bereichen zwischen 0 % und ca. 25 % schwanken, wobei für magnetische Partikel mit Korngrößen $>2 \mu\text{m}$ die Frequenzabhängigkeit kleiner 3 % ist. Da anthropogen entstandene magnetische Partikel meist Korngrößen $>2 \mu\text{m}$ aufweisen bietet die Bestimmung der Frequenzabhängigkeit daher die Möglichkeit, in einer Probe zu unterscheiden, ob die magnetischen Partikel vorwiegend natürlicher oder anthropogener Herkunft sind (HAY & al. 1997).

Die Kartierung der magnetischen Suszeptibilität erfolgte mit einem Bartington MS2 D Sensor und GPS (Trimble Total Station 4700, differentielle Korrektur, Lagegenauigkeit $\pm 1 \text{ m}$). Der Messpunkt-Abstand betrug ca. $150 \pm 40 \text{ m}$. Die Vermessung wurde vorwiegend an Wiesenböden vorgenommen, teilweise wurden auch Waldböden gemessen. Diese Daten sind gesondert gekennzeichnet. Der Abstand zu Straßen wurde meist über 20–30 m gehalten, da in dieser Entfernung der Einfluss des Straßenverkehrs vernachlässigbar ist (HOFFMANN & al. 1999). An jedem Messpunkt wurde die Messung 3–5 mal wiederholt. Die Datenauswertung erfolgte an arithmetischen Mittelwerten. An 10 ausgewählten Punkten wurde die vertikale Verteilung der magnetischen Suszeptibilität detailliert untersucht. Dort wurden Schürfe bis zu einem Meter Tiefe gegraben. Teilweise wurden vorhandene Böschungen ca. 30 cm abgegraben, dann wurde an den Profilen die magnetische Suszeptibilität mit einem Exploranium KT 9 Gerät aufgezeichnet. Die Aufzeichnung erfolgte im Abstand von 2–3 cm. Über das gesamte Messgebiet verteilt wurden mit einer Schlagsonde bis zu 30 cm lange Bodenkerne entnommen. An diesen Kernen wurde im Labor ebenfalls die Tiefenänderung der magnetischen Suszeptibilität gemessen und Detailproben entnommen, die entsprechend der Entnahmetiefe in Oberbodenproben (8–10 cm Tiefe) bzw. Unterbodenproben (26–28 cm Tiefe) eingeteilt wurden.





Zur Charakterisierung der magnetischen Trägerminerale in den Proben wurden magnetische Sättigungen, Sättigungsgrad-Bestimmungen, Abmagnetisierungen der Sättigungsintensität und Curiepunkt-Bestimmungen vorgenommen. Wird eine Probe im Labor einem starken magnetischen Gleichfeld ausgesetzt, entsteht in der Probe eine entsprechende Remanenz (IRM; Isothermale Remanente Magnetisierung). Mit zunehmender Feldstärke nimmt auch die IRM zu, bis aufgrund der magnetischen Mineralogie keine weitere Steigerung mehr möglich, und die magnetische Sättigung (SIRM) erreicht ist. Ferrimagnetische Minerale, wie zum Beispiel Magnetit und Maghämilit, sind bei Feldstärken in der Größenordnung von 300 mT vollständig gesättigt. Antiferromagnetische Minerale (z. B.: Hämatit) und ferromagnetische Minerale (z. B. Goethit) benötigen dafür Feldstärken von mehr als 2.5 T, entsprechend dem 50.000-fachen Erdmagnetfeld. Wird die Probe anschließend einem entgegengesetzt gerichteten Feld ausgesetzt, folgt die Magnetisierung einer Hysteresisschleife, wobei im allgemeinen relativ geringe Feldstärken genügen, um die Probe vom Zustand der Sättigung auf einen Zustand völliger Abmagnetisierung zu bringen. Sättigungsremanenz (SIRM) und Form der Hysteresisschleife sind von der Korngröße weitgehend unbeeinflusst und geben Hinweise auf die Konzentration und Art der magnetischen Minerale in der Probe. Das Sättigungsverhalten kann mit Hilfe verschiedener Faktoren quantitativ erfasst werden. Zur Ermittlung des Sättigungsgrades wird zuerst SIRM gemessen und anschließend IRM bei 100 mT in Gegenrichtung : $S\text{-Faktor} = (-IRM - 100 \text{ mT}) / (SIRM)$. Dieser Faktor ist für ferrimagnetische Minerale nahe bei 1 und sinkt mit steigendem Anteil von ferromagnetischen und antiferromagnetischen Mineralen wie Goethit und Hämatit (VEROSUB & ROBERTS 1995).

Proben werden schrittweise magnetisch gereinigt, indem sie zunehmend stärkeren magnetischen Wechselfeldern ausgesetzt werden, wobei nach jedem Reinigungsschritt die verbleibende remanente Magnetisierung gemessen wird. Entsprechende magnetische Abschirmungen verhindern die Entstehung von Remanenzkomponenten unter dem Einfluss des Laborfeldes. Das magnetische Wechselfeld, bei dem eine Probe die Hälfte der remanenten Magnetisierung verloren hat, nennt man Median Destruktiv Field (MDF). Dieser Parameter gibt Hinweise auf die magnetischen Trägerminerale, so verliert Magnetit die remanente Magnetisierung bei Wechselfeldern bis 30 mT, die remanente Magnetisierung von Hämatit oder Goethit hingegen bleibt bis über 150 mT erhalten (SOFFEL 1991).

Die Sättigung der Proben erfolgte schrittweise bis 2.5 Tesla bei Raumtemperatur. Für die Bestimmung des Sättigungsgrades wurden die Proben anschließend in der entgegengesetzten Richtung bei 300 mT magnetisiert. Anschließend erfolgte die schrittweise Abmagnetisierung im Wechselfeld bei Feldstärken von 2–100 mT. Die Remanenzmessungen erfolgten an einem 2G-Cryogen-Magnetometer mit integrierter Wechselfeld-Abmagnetisierung.

Die Curietemperatur (T_c), oberhalb derer ferromagnetische Minerale paramagnetisches Verhalten zeigen, ist eine konzentrationsunabhängige, spezifische physikalische Eigenschaft eines bestimmten Minerals. Für die Curietemperaturbestimmung wurde das Probenmaterial magnetisch separiert. Am getrockneten Separat wurde dann die thermische Änderung der Suszeptibilität bis 700 °C (Heiz- und Kühlkurve) aufgezeichnet.

3. Ergebnisse

Die Verteilungskarte der magnetischen Suszeptibilität ist in Abb. 1 dargestellt. Die vier Kategorien sind aus der statistischen Auswertung aller Suszeptibilitätsdaten abgeleitet. Die erste Kategorie entspricht Messwerten unterhalb des Medians, die zweite Kategorie umfasst Messpunkte die zwischen Median und 3. Quartil liegen. Die dritte Kategorie wird durch den Range (Mittelwert + Standardabweichung) bestimmt. Daten, die oberhalb des Ranges liegen, fallen in die vierte Kategorie.



In den meisten Schürfen ist die magnetische Suszeptibilität im Oberboden am höchsten und nimmt zur Tiefe hin ab (Abb. 2). Ein Schurf im Gößgraben zeigt im Oberboden die geringste Suszeptibilität mit ansteigender Tendenz zur Tiefe.

An allen Proben wurde die magnetische Suszeptibilität und die Frequenzabhängigkeit der Suszeptibilität gemessen. Diese Analyseergebnisse bildeten die Basis für die Auswahl der Detailproben. Aus der Gegenüberstellung der spezifischen Suszeptibilität und Fre-

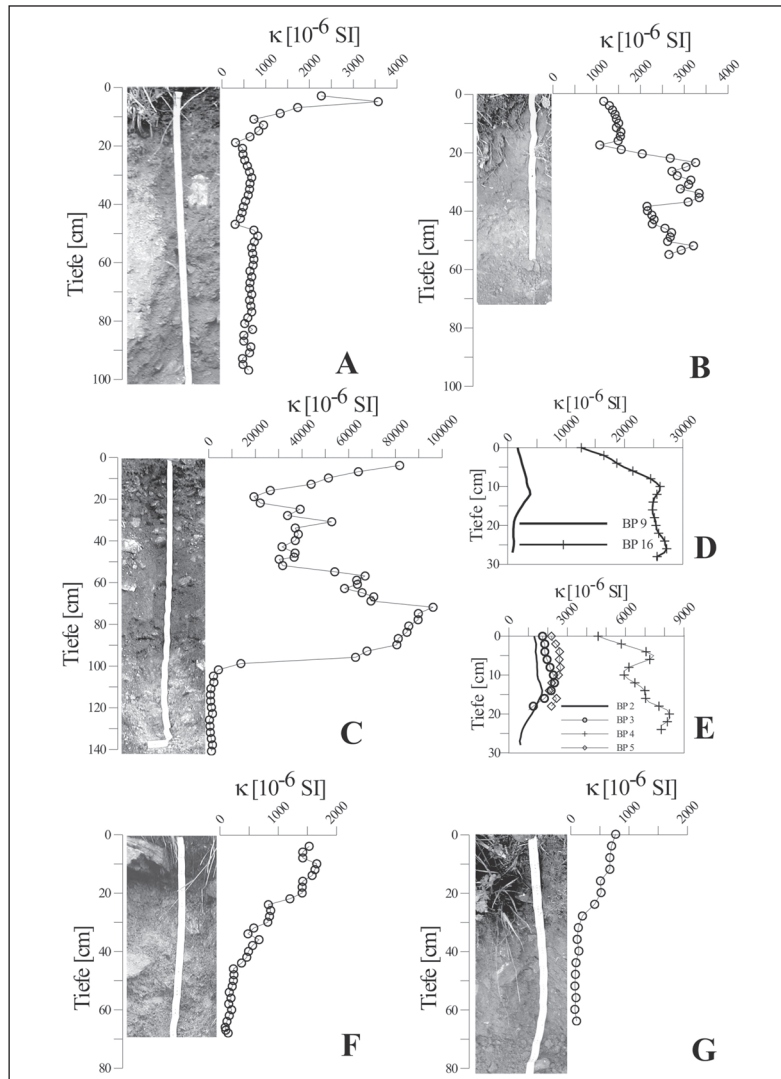


Abb. 2: Vertikale Suszeptibilitätsverteilung in Profilen und Bodenkernen. Anthropogen beeinflusste Böden zeigen erhöhte magnetische Suszeptibilität im Oberboden, in geogen beeinflussten Böden steigt die magnetische Suszeptibilität mit zunehmender Tiefe an. (A) Trofaiach, (B) Gößgraben, (C) Vordernberg, gegenüber dem ehemaligen Radwerk XII, (D) Kerne aus Vordernberg, (E-G) Eisenerz. Vertical distribution of susceptibility in profiles and cores. Soils influenced by human activity show higher susceptibility in the top soil, while in soils only influenced by the local geology the susceptibility increases with depth. (A) Trofaiach, (B) Gößgraben, (C) Vordernberg, opposite the former Radwerk XII, (D) Cores from Vordernberg, (E-G) Eisenerz.

quenzabhängigkeit kann man Korngrößenunterschiede ablesen (Abb. 3). Bodenproben mit geringer Frequenzabhängigkeit ($f_d < 3\%$) werden von technologischen Phasen mit Korngrößen $> 2\ \mu\text{m}$ dominiert, während natürliche magnetische Minerale mit Korngrößen meist unter $1\ \mu\text{m}$ stark frequenzabhängig sind.

Die IRM Analyse zeigt in allen Proben mindestens zwei Komponenten. Die mittlere Koerzitivität (das magnetische Gleichfeld, bei dem das magnetische Mineral die Hälfte der Sättigung erreicht hat) aller IRM-Hauptkomponenten liegt zwischen 12 und 35 mT. Die mittleren Koerzitivitäten der Nebenkomponten schwanken zwischen 150 und 1500 mT. Ein Vergleich der Sättigungsintensität mit der Suszeptibilität erlaubt Aussagen über die Konzentration und Korngröße der magnetischen Phasen in den Proben (Abb. 4). Die Auswertung nach THOMPSON & OLDFIELD (1986) zeigt für die Proben aus Vordernberg, dass nur geringe Korngrößenschwankungen auftreten und der Unterschied lediglich in der Konzentration der magnetischen Phase zu finden ist. Die Proben aus Eisenerz, aus dem Bereich um Trofaiach (vor allem BP15 aus dem Gößgraben) und des Bereiches am Präbichl zeigen eine größere Schwankung. Eine kleine Gruppe von Unterbodenproben ist deutlich abzugrenzen.

Die Curietemperatur liegt bei den meisten Proben zwischen 590 und 600 °C. Einige Proben zeigen einen Anstieg der magnetischen Suszeptibilität bei ca. 300 °C, der auf Phyrrotin, Lepidokrokit oder Greigit zurückzuführen ist (Abb. 5).

4. Interpretation

Aus der Verteilungskarte der magnetischen Suszeptibilität (Abb. 1) ist ersichtlich, dass die Anomalie in zwei voneinander unabhängige Anomalien unterteilt werden kann. Die Grenze bildet der Präbichl.

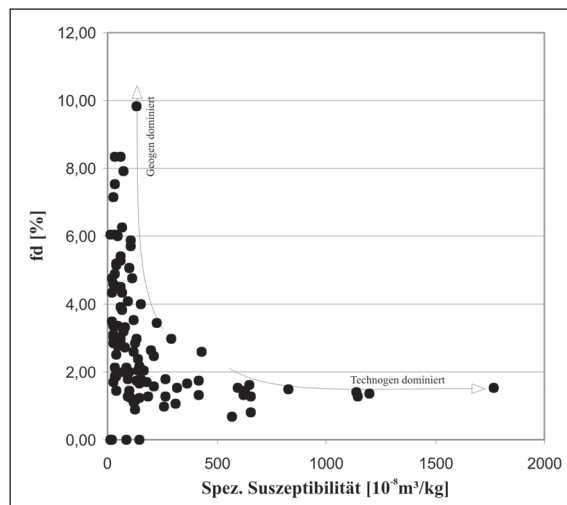


Abb. 3: Spezifische Suszeptibilität und Frequenzabhängigkeit für alle Bodenproben. Die Frequenzabhängigkeit ist ein Korngrößenindikator, sie ist bei feinen magnetischen Körnern hoch, grobkörniges Material zeigt eher frequenzunabhängiges Verhalten. Dies ermöglicht die Unterscheidung zwischen magnetischen Partikel vorwiegend natürlicher ($f_d > 8\%$) oder anthropogener ($f_d < 3\%$) Herkunft.

Specific susceptibility and frequency dependence for all soil samples. The dependence on frequency is an indicator for grain size. In fine grained materials it is very high, while coarse grained soils are frequency independent. This allows to distinguish between particles of natural origin ($f_d > 8\%$) versus particles of anthropogenic origin ($f_d < 3\%$).

4.1 Das Gebiet südlich des Präbichl

Die Anomalie erstreckt sich im gesamten Tal des Vordernberger Baches, die Seitentäler sind nur dort beeinträchtigt, wo die dazwischenliegenden Gebirgsrücken nicht hoch genug waren, um einen Lufttransport der magnetischen Phasen zu verhindern. Das Maximum der Anomalie liegt in der Nähe des Bahnhofes Vordernberg Süd. Bei der Kartierung im Gelände wurde eine bis zu 80 cm mächtige, tiefschwarze Rußschicht an einem Straßenaufschluss gegenüber des Traktormuseums in Vordernberg erkannt. Sie lässt sich im gesamten Tal verfolgen, allerdings mit unterschiedlicher Dicke. Sie dürfte ein Relikt der historischen Eisenindustrie in Vordernberg sein. Diese Rußschicht ist hochmagnetisch und daher für die Suszeptibilitätsanomalie verantwortlich. Richtung Süden nehmen die Suszeptibilitätswerte ab, die Belastung war aber im gesamten Raum Trofaiach messbar. Die Suszeptibilität wird in den Seitentälern niedriger.

Im **Gößgraben** ist nach einem Rückgang der Suszeptibilität unter 450×10^{-6} SI ein erneuter Anstieg erkennbar. Im hinteren Gößgraben treten Diabase mit erhöhten Suszeptibilitätswerten auf (STRÖBL 1980). Das Profil (Abb. 2) zeigt geogene Charakteristik, da die magnetische Suszeptibilität im Unterboden höher ist als die Suszeptibilität im Oberboden. Ein Bereich zwischen 20 und 30 cm Tiefe im Profil mit der höchsten magnetischen Suszeptibilität wurde auch aufgrund der rötlichen Farbe als Oxidationshorizont interpretiert. Die IRM Komponentenanalyse zeigte neben der niedrigkoerzitativen Phase mit $B_{1/2}$ ca. 20 mT noch eine höherkoerzitative Phase. Diese höherkoerzitative Phase nimmt in den tieferen Bodenproben auf über 50 % zu. Dies ist ein Hinweis, dass diese Phase geogenen Ursprungs ist. Diese kleinräumige Anomalie wurde daher als geogen verursacht interpretiert.

Die Anomalie bei **Vordernberg** erstreckt sich entlang des Tals des Vordernberger Bachs von Hafning bei Trofaiach im Süden bis nach St. Laurenti im Norden. Auffallend ist die durchschnittlich 20 cm mächtige Rußlage, die im gesamten Tal auftritt. Die größte Mächtigkeit erreichte sie in unmittelbarer Nähe der ehemaligen Radwerke XII, XIII und XIV. An dieser Stelle wurden ein Profil gemessen und Bodenproben aus dem Schurf entnommen. In der Nähe des Radwerk VII (Friedauwerk) wurde eine Kernprobe entnommen. Bei der

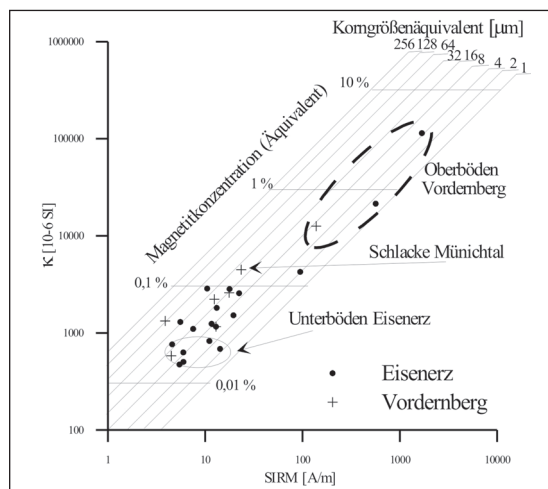


Abb. 4: Diagramm nach THOMPSON & OLDFIELD (1986) für alle Bodenproben. Es zeigt für die Gruppe Vordernberg ähnliche Korngrößen aber Konzentrationsunterschiede an. Für die Gruppe Eisenerz ist der Einfluss der Schlackehalde ersichtlich.

Diagram after THOMPSON & OLDFIELD (1986) for all soil samples. The diagram shows for the group from Vordernberg similar grain sizes, but different concentrations. For the sample group from Eisenerz, the influence of the slag heap is visible.



Kartierung im Gelände wurden auf den Wiesen entlang des Baches zwischen den beiden beschriebenen Standorten mehrmals Schlackenstücke gefunden, die der Vordernberger Bach nicht abtransportiert hatte. Im Profil (Abb. 2) treten ausschließlich Gesteine als Grobkomponenten im Boden auf, Schlackenstücke sind nicht vorhanden. Das Profil zeigt typisch anthropogene Belastungscharakteristik mit stark erhöhten magnetischen Suszeptibilitätswerten im Oberboden, der an diesem Standort eher als Russlage bezeichnet werden kann, und sehr niedrigen magnetischen Suszeptibilitätswerten im Unterboden. Die Schwankung der Suszeptibilität in dem Bereich zwischen 20 und 60 cm Tiefe ist auf den unterschiedlichen Anteil an Gesteinskomponenten (hauptsächlich Quarz) zurückzuführen.

Beide Bodenkerne zeigen anthropogene Belastungscharakteristik (Abb. 2), jedoch mit unterschiedlichen Amplituden. Im Bodenkern BP 9 (St. Laurenti) ist erkennbar, dass die belastete Schicht bis in eine Tiefe von 20 cm reicht, die geringe Suszeptibilität in den obersten Bereichen ist auf die geringe Dichte im Oberboden zurückzuführen. Im BP 16, der in Friedauwerk entnommen wurde, reichte die Rußlage tiefer als 30 cm. Die Frequenzabhängigkeit der Suszeptibilität zeigte für einige Proben eindeutig die Dominanz technogener Phasen. Für andere Proben konnte diesbezüglich keine Aussage getroffen werden, da die spezifische Suszeptibilität zu gering ist. In allen Proben bilden niedrigkoerzitive Phasen ($B_{1/2} \sim 20$ mT) die Hauptkomponente.

Aufgrund der hohen Suszeptibilitätsanomalie wurden chemische Analysen an zwei Proben durchgeführt. Die Schwermetallgehalte sind in Tab. 1 angeführt. An keinem Untersuchungsstandort wird der gesetzliche Grenzwert (KRAINER 2000) für ein Schwermetall überschritten, auffallend ist aber der sehr hohe Wert der Summe aller polyzyklischen, aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAH_SUM) bei BP 18. Dieser Wert wurde von dem hohen Rußanteil in dieser Probe verursacht.

Tab. 1: Ergebnisse der chemischen Analyse der Bodenproben im Gebiet der Anomalie Vordernberg. Als Grenzwerte sind die im Jahr 2000 gültigen, gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte für Oberböden angegeben. Normalwerte entsprechen dem als normal angesehen geogenen Hintergrundwert der Böden in der Steiermark (KRAINER 2000).
Results from the chemical analysis of the soil samples from the anomaly around Vordernberg. For the limiting values we used the legal limits from 2000 for top soils. The background values correspond to those considered as normal background of geological origin in Styria.

Probenname	Pb	Cr	Ni	Co	Mo	Cd	Hg	As	Cu	Zn	PAH_SUM	κ [10^{-6} SI]
BP 17	9	8,4	35,4	20,6	0,99	0,19	0,31	13,7	16,8	94,8	39	152613
BP 18	17,3	10,7	21,1	7,8	1,88	0,13	0,32	9,9	17,6	51,5	622	11233
Grenzwert	100	100	60	50	10	2	2	20	100	300		
Normalwert	30	80	60	30	1,5	0,3	0,25	40	50	140	KRAINER (2000)	

4.2 Präbichl

Im Gebiet um den Präbichl sind leicht erhöhte Messwerte direkt an der Passhöhe und am Westhang zum Eisenerzer Reichenstein durch die Nähe der Messpunkte zur Straße und zur ehemaligen Eisenbahntrasse verursacht. Die höchste magnetische Suszeptibilität tritt am Wanderweg zur Leobener Hütte auf (Abb. 1). An diesem Messpunkt ist die rot-beige Färbung der Erde, die im restlichen Gebiet eher dunkel ist, auffallend. Die Rotfärbung ist ein Hinweis auf Oxidation von eisenreichen Mineralen. An den Messpunkten, die nicht im Einfluss der Straße oder Eisenbahn stehen, sind die Suszeptibilitätswerte vergleichsweise niedrig. Die Messung der magnetischen Suszeptibilität an den Kernen zeigte nur an einem Standort Hinweise auf geogene Beeinflussung, die anderen Kerne weisen anthropogene Belastungscharakteristik mit geringer Amplitude auf.

Die Hauptkomponente der magnetischen Phasen ist technogen. Die IRM Hauptkomponente in den Proben ist niedrigkoerzitiv, $B_{1/2}$ schwankte zwischen 12 und 35 mT. Der Anteil an höherkoerzitiven Phasen nimmt im Vergleich zu den Proben aus Vordern-



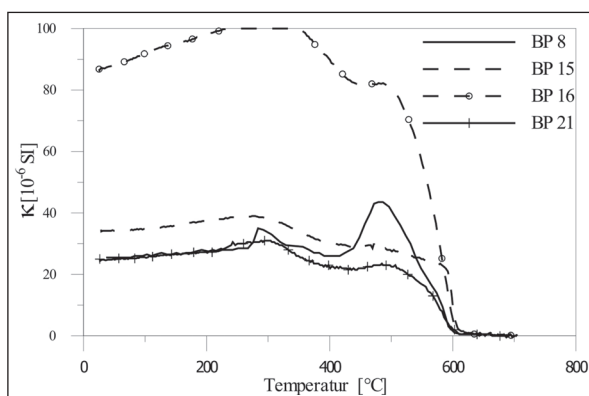


Abb. 5: Charakteristische Heizkurven zur Bestimmung der Curietemperatur. Der Anstieg der magnetischen Suszeptibilität bei ca. 300 °C weist auf Pyrrhotin, Lepidokrokit oder Greigit hin. Der Abfall der Suszeptibilität bei ca. 590 °C ist charakteristisch für magnetit-ähnliche Phasen. Characteristic heating paths for the determination of the Curie temperature. The increase of the magnetic susceptibility at about 300 °C indicates the presence of pyrrhotine, lepidokrokit or greigit. The decrease of the susceptibility at around 590 °C is characteristic for mineral phases similar to magnetite.

berg zu. Bei der Wechselfeldabmagnetisierung dominieren instabile, technogene Phasen. Belastung durch technogene Phasen tritt auch am Präbichl auf, jedoch ist die Konzentration so gering, dass sie mit Feld-Messgeräten bei der Kartierung nicht mehr detektiert werden konnte.

4.3 Das Gebiet nördlich des Präbichl

Die Anomalie im Raum Eisenerz zeigt relativ niedrigere Suszeptibilitätswerte. Die höchsten Messwerte treten in der Nähe des Schlackenberges in Münichtal und am Fuß des Erzberges entlang der Straße Richtung Ramsau (bei einem Aufbereitungswerk) auf. Eine eindeutige Zuordnung der Belastung zu einem Bodenhorizont, der im gesamten Gebiet auftritt, kann hier nicht getroffen werden. Die meisten Schürfe im Untersuchungsgebiet zeigen anthropogene Belastungscharakteristik mit erhöhter magnetischer Suszeptibilität im Oberboden (Abb. 2), was hier durch die historische Radwerkindustrie und auch durch Erosion und Windverfrachtung der hochmagnetischen Schlacke erklärt werden konnte. Die Frequenzabhängigkeit zeigt für die relevanten Proben deutlich technogene Herkunft (Abb. 3).

5. Schlussfolgerungen

Die magnetische Suszeptibilitätsanomalie im Raum Trofaiach bis Eisenerz (HANESCH & SCHOLGER 2002), kann aufgrund der Detailuntersuchung in zwei Teilanomalien in Vordernberg und Eisenerz geteilt werden. Die Grenze bildet der Präbichl. Beide Anomalien sind anthropogen verursacht, sowohl die Schürfe als auch mineralmagnetische Messungen zeigen eindeutig die Dominanz technogener Partikel.

Ein Vergleich mit den Ergebnissen aus dem Raum Leoben zeigt, dass die Staubbelastung, die im Raum Leoben auftritt, nicht bzw. nur zu einem sehr kleinen Teil in das Untersuchungsgebiet eindringt, da die mittlere Koerzitivität aller IRM-Hauptkomponenten zwischen 12 und 35 mT liegt, wohingegen die Blattproben in Leoben mittlere Koerzitivitäten zwischen 40 und 50 mT zeigen und auch keine ansteigende Tendenz Richtung Leoben zu erkennen war.



Im hinteren Gößgraben befindet sich über Ignimbriten eine geogen bedingte Anomalie. Die magnetische Suszeptibilität der Böden in den alpinen Nutzflächen im Untersuchungsgebiet ist niedrig. Es gibt dort keine Hinweise auf anthropogene Belastung durch magnetische Partikel aus Industrieemissionen.

Dank

Diese Arbeit wurde im Rahmen des EU-Projekts MAGPROX (EVK2-CT-1999-00019) durchgeführt. Die Autoren bedanken sich bei Dr. W. KRAINER (Landwirtschaftliches Versuchszentrum Graz) für die Unterstützung der Arbeit und bei Dr. G. RANTITSCH für Anregungen zur Verbesserung des Manuskripts.

Literatur

- BITYUKOVA L., SCHOLGER R. & BIRKE M. 1999: Magnetic Susceptibility as Indicator of Environmental Pollution of Soils in Tallinn. – *Physics and Chemistry of the Earth* 24: 829–835.
- BOYKO T., SCHOLGER R. & STANJEK H., MAGPROX TEAM 2004: Topsoil magnetic susceptibility mapping as a tool for pollution monitoring: repeatability of in situ measurements. – *Journal of Applied Geophysics* 55: 249–259.
- DEKKERS M. J. 1997: Environmental magnetism: an introduction. – *Geologie en Mijnbouw* 76: 163–182.
- HANESCH M. & SCHOLGER R. 2002: Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements. – *Environmental Geology* 42: 857–870.
- HANESCH M. & SCHOLGER R. 2005: The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. – *Geophysical Journal International* 161 (1): 50–56.
- HANESCH M., SCHOLGER R. & REY D. 2003A: Mapping dust distribution around an industrial site by measuring magnetic parameters of tree leaves. – *Atmospheric Environment* 37: 5125–5133.
- HANESCH M., MAIER G. & SCHOLGER R. 2003B: Mapping heavy metal distribution by measuring the magnetic susceptibility of soils. – *Journal de Physique IV* 107: 605–608.
- HAY K. L., DEARING J. A., BABAN S. M. J. & LOVELAND P. 1997: A Preliminary Attempt to Identify Atmospherically-Derived Pollution Particles in English Topsoils from Magnetic Susceptibility Measurements. – *Physics and Chemistry of the Earth* 22: 207–210.
- HOFFMAN V., KNAB M. & APPEL E. 1999: Magnetic susceptibility mapping of roadside pollution. – *Journal of Geochemical Exploration* 66: 313–326.
- KAPICKA A., PETROVSKÝ E., USTJAK S. & MACHÁČKOVÁ K. 1999: Proxy mapping of fly-ash pollution of soils around a coal-burning power plant: a case study in the Czech Republic. – *Journal of Geochemical Exploration* 66: 291–297.
- KAPICKA A., JORDANOVA N., PETROVSKY E. & USTJAK S. 2001: Effect of different soil conditions on magnetic parameters of power-plant fly ashes. – *Journal of Applied Geophysics* 48: 93–102.
- KÖSTLER H. J. & SLESÁK J. 1986: Die Radwerke zu Vordernberg in der Steiermark. – Podmenik, Fohnsdorf.
- KRAINER W. 2000: Bodenschutzbericht 2000.
<http://www.stmk.gv.at/umwelt/luis/UMWELTSCHUTZ/bodenschutz/cd/Texte/BSB2000.pdf>
- LECOANET H., LÉVÊQUE F. & AMBROSI J. P. 2001: Magnetic properties of salt-marsh soils contaminated by iron industry emission (southeast France). – *Journal of Applied Geophysics* 48: 67–81.
- MATZKA J., MAHER B. A. 1999: Magnetic biomonitoring of roadside tree leaves: identification of spatial and temporal variations in vehicle-derived particulates. – *Atmospheric Environment* 33: 4565–4569.
- MORENO E., SAGNOTTI L., DINARÈS-TURELL J., WINKLER A. & CASCELLA A. 2003: Biomonitoring of traffic air pollution in Rome using magnetic properties of tree leaves. – *Atmospheric Environment* 37: 2967–2977.
- QUEROL X., PARÉS J. M., PLANA F., FERNÁNDEZ-TURIEL J. L. & LÓPEZ-SOLER A. 1993: Fly ash content and distribution in lake sediments around a large power station: inferences from magnetic susceptibility analysis. – *Environmental Geochemistry and Health* 15 (4): 9–18.
- SOFFEL H. C. 1991: Paläomagnetismus und Archäomagnetismus. Springer, Berlin
- SPEL G. 1984: Steirische Eisenstrasse. – Publikationsausschuss des Montanhistorischen Vereines für Österreich, Leoben.
- STRÖBL E. 1980: Maschinelle Interpretationshilfen in der Geomagnetik mit Anwendungsbeispielen aus dem Gebiet zwischen nördlichen Kalkalpen und Saualpe. – Dissertationsschrift, Montanuniversität Leoben.
- THOMPSON R. & OLDFIELD F. 1986: Environmental Magnetism. Allen & Unwin, London
- VERSUB K. L. & ROBERTS A. P. 1995: Environmental Magnetism: Past, Present, and Future. – *Journal of Geophysical Research* 100 (B2): 2175–2192.

