

DISS. ETH NO. 20383

FERROMAGNETIC RESONANCE
SPECTROSCOPY AND HOLOCENE EARTH'S
MAGNETIC FIELD VARIATIONS IN SEDIMENTS FROM
SWISS LAKES

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

JESSICA KIND

Diploma in Geoecology, Technische Universität
Bergakademie Freiberg, Germany

born on May 18, 1982

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Ann M. Hirt, examiner

Prof. Dr. Andrew Jackson, co-examiner

Prof. Dr. Reidar Løvlie, co-examiner

Prof. Dr. Helmut J. Weissert, co-examiner

2012

Abstract

Lake sediments are amongst natural archives those with the highest temporal resolution and have, therefore, been used to reconstruct the environmental history, and variations of the Earth's magnetic field. Magnetic minerals are proxies that comprise both kinds of information. To extract information about environmental history, benefit has been taken from the spatial and temporal occurrence of the entire variety of magnetic minerals. In contrast, magnetic minerals that carry information about the Earth's magnetic field variation have to be of ideal quality with respect to their chemical and magnetic stability. Extracting these specific information from lacustrine sediments require detailed knowledge about composition, concentration, grain size and configuration of the magnetic inventory.

Even though the link between the magnetization of magnetic minerals and the Earth's magnetic field seems to be understood, the relationship between magnetic mineralogy and the environment is highly individual. In this thesis, representative sediment samples from Soppensee, and Lake Baldegg in Central Switzerland have been analysed in order to investigate how natural processes effect the magnetic properties. Both lakes are formed by the retreat of the Reuss glacier at the end of the Wurm glaciation. The origin of magnetic particles are as diverse as processes involved during the lake development. Magnetic particles are transported by hydrological and aeolian processes into the lake or formed in the lake. *In situ* formation of magnetic particles are the result of inorganic or biological processes. The classical example for the latter is the intercellular precipitation of magnetic particles in magnetotactic bacteria. The present work is concerned with the improvement of basic knowledge about the magnetic properties in sediments as well as the development of a methodological approach for the detection of biogenic magnetic particles.

Special attention was given to the effect of environmental changes on the production and dissolution of biogenic magnetite in Soppensee.

An application of dual-frequency ferromagnetic resonance spectroscopy was applied to detect magnetotactic bacteria or their fossil remains. In this approach the anisotropy properties of cultured magnetotactic bacteria of the strain *Magnetospirillum gryphiswaldense* are compared to those of Holocene sediments. Based on the anisotropy properties of Holocene sediments, an empirical spectral separation of the ferromagnetic resonance signal was developed in order to isolated characteristic features found for intact magnetotactic bacteria. This spectroscopic approach was calibrated with magnetometric methods, such as first-order reversal curves. This comparative approach demonstrates that ferromagnetic resonance spectroscopy supports the commonly used rock magnetic methods with respect to composition, concentration, and grain size and is beneficial to gain information about the configuration of the magnetic mineral assemblages.

Furthermore, magnetometric and spectroscopic analysis in a wide temperature range was successfully applied to reconstruct the development of Soppensee during the last 18,000 years, i.e. the late Pleistocene. Main environmental changes are documented by the cease of detrital input at the end of the Pleistocene and the colonization of magnetotactic bacteria during the Holocene. Such changes are linked to variations in climate (cold-warm cycles) and to geochemical conditions (oxic-anoxic cycle) in the depositional environment. The example from Soppensee demonstrates that the combined use of magnetometric and spectroscopic methods have the potential for a wide range of applications in environmental magnetism that can provide further details about the relationship between magnetic measurements and environmental changes in a geological time frame.

The second part of the thesis is concerning the reconstruction of the Earth's magnetic field. The magnetic mineralogy from Soppensee and Lake Baldegg are of suitable quality to analyse the temporal variation of the Earth's magnetic field. By combining the results of both lakes, a reliable paleomagnetic dataset, including relative paleointensity and paleosecular variation is presented for Switzerland. The

temporal resolution of the paleomagnetic dataset for the composite record is high enough to record seven archeomagnetic jerks, which have been proposed in other studies. These occur at 1500, 2650, 4400, 5100, and 6600 cal yr BP. The identification of such sudden changes of the Earth's magnetic field provide useful information for modelling processes governing the Earth's magnetic field.

Finally, knowledge about the magnetic inventory in lacustrine sediments is key for the reconstruction of the environmental history and the Earth's magnetic field evolution and, therefore, the development of new analytical tools to analyse intrinsic and extrinsic properties of the magnetic carriers can stimulate future research.

Zusammenfassung

Seesedimente sind neben anderen natürlichen Archiven diese mit der höchst möglichen zeitlichen Auflösung und werden infolgedessen für die Rekonstruktion der Umwelthistorie und des variierenden Erdmagnetfeldes genutzt. Magnetische Mineralkomponenten speichern beide Arten von Informationen und können demzufolge als Proxy-daten verwendet werden. Um Informationen über die Umwelthistorie zu extrahieren, wird das räumliche und zeitliche Auftreten aller magnetischer Mineralkomponenten betrachtet. Im Gegensatz dazu müssen magnetischen Minerale, bezüglich ihrer chemischen und magnetischen Stabilität von bestimmter Qualität sein, um für die Rekonstruktion des Erdmagnetfeldes geeignet zu sein. Um diese spezifischen Informationen aus den Seesedimenten zu extrahieren, sind genaue Kenntnisse über die Zusammensetzung, Konzentration, Korngrösse und die Konfiguration der in Seesedimenten vorkommenden magnetischen Minerale erforderlich.

Auch wenn die Beziehung zwischen der Magnetisierung magnetischer Minerale und dem Erdmagnetfeld verstanden zu sein scheint, sind die Zusammenhänge der in Seesedimenten vorkommenden magnetischen Minerale und den Umweltbedingungen sehr individuell. In der vorliegenden Arbeit wurden repräsentative Proben von Sedimentkernen zweier Seen in der Zentralschweiz: Soppensee und Baldeggersee analysiert, um die Einflüsse von natürlichen Prozessen auf die Eigenschaften der magnetischen Minerale zu untersuchen. Beide Seen sind durch den Rückzug des Reuss-Gletschers am Ende der Würmeiszeit entstanden. Der Ursprung magnetischer Mineralkomponenten in Seesedimenten ist so divers, wie die Prozesse während der Entstehung dieser Seen. Magnetische Minerale können durch hydrologische und äolische Prozesse in die Seen transportiert werden, oder aber im See gebildet werden. *In situ* gebildete magnetische Mineralkomponenten können wiederum das Ergebnis von anorganischen oder biologischen Prozessen sein. Ein klassisches Beispiel für biologische Prozesse von magnetischer Mineralbildung sind interzellulär

ausgefällte Magnetitminerale in magnetotaktischen Bakterien. Diese Arbeit befasst sich mit der Verbesserung des Grundwissens über die magnetischen Eigenschaften in Seesedimenten, wie auch mit der Entwicklung von methodischen Herangehensweisen zum Nachweis von biologisch gebildeten magnetischen Mineralen.

Besonderes Augenmerk wurde auf die Auswirkung von Umweltveränderungen auf Entstehungs- und Auflösungsprozesse von biologisch gebildetem Magnetit im Soppensee gelegt. Ferromagnetische Resonanzspektroskopie in zwei Frequenzbändern wurde angewandt, um magnetotaktische Bakterien und deren fossile Überreste nachzuweisen. Mit dieser Herangehensweise wurden Anisotropieeigenschaften von kultivierten magnetotaktischen Bakterien der Spezies *Magnetospirillum gryphiswaldense* mit denen von Seesedimenten aus dem Holozän verglichen. Basierend auf den Anisotropieeigenschaften Holozäner Sedimente wurde eine empirische Zerlegung des ferromagnetischen Resonanzsignals entwickelt, mit dem ein für magnetotaktische Bakterien charakteristisches Signal isoliert werden konnte. Dieser spektroskopische Ansatz wurde weiterhin mit magnetometrischen Methoden kalibriert und veranschaulichte, dass die Methode der ferromagnetischen Resonanzspektroskopie einerseits die gesteinsmagnetischen Methoden unterstützt, wie beispielsweise in Bezug auf die Konzentration, und Korngrösse von magnetischen Mineralen und zum anderen neue Informationen über die Konfiguration von magnetischen Mineralen in Seesedimenten liefern kann.

Magnetometrische und spektroskopische Analysen in weiten Temperaturbereichen wurde durchgeführt, um die Entstehung des Soppensees der letzten 18,000 Jahre (spätes Pleistozän) zu rekonstruieren. Die wichtigsten Umweltveränderungen sind das Versiegen des detritischen Einflusses zum Ende des Pleistozäns und die Besiedelung von magnetotaktischen Bakterien während des Holozäns. Diese Veränderungen sind gekoppelt mit klimatischen Veränderungen (Warm-Kaltzyklen) und geochemischen Variationen im Ablagerungsmilieu des Sees (oxisch-anoxische Zyklen). Der Soppensee veranschaulicht das

Potential von magnetometrischen und spektroskopischen Methoden, um den Zusammenhang von magnetischen Messungen und Umweltveränderungen in geologischen Zeiträumen besser verstehen zu können.

Der zweite Teil der vorliegenden Arbeit beschäftigt sich mit der Rekonstruktion des Erdmagnetfeldes. Die magnetischen Eigenschaften des Soppensees und des Baldeggersees waren von guter Qualität, um die zeitlichen Veränderungen des Erdmagnetfeldes zu studieren. Die Ergebnisse von beiden Seen wurden kombiniert, um eine verlässliche Zeitreihe der Paläosäkularvariation und der relativen Intensität für das Holozän zu erhalten. Die zeitliche Auflösung dieser Paläosäkularvariationszeitreihe war akkurat genug, um sieben archeomagnetische "jerks", d.h. abrupte zeitliche Veränderungen des Erdmagnetfeldes, um etwa 1500, 2650, 4400, 5100 und 6600 cal yr BP aufzuzeichnen und diese können als Grundlage für Modellierungen des Erdmagnetfeldes verwendet werden.

Das Wissen über das magnetische Inventar in Seesedimenten ist ein wichtiger Teil für die Rekonstruktion der Umwelthistorie und des Erdmagnetfeldes in geologischen Zeiträumen. Diese Arbeit hat gezeigt, dass die Entwicklung neuer analytischer Methoden zur Untersuchung von intrinsischen und extrinsischen Eigenschaften magnetischer Minerale stimulierend sein kann für zukünftige Forschungsarbeiten.