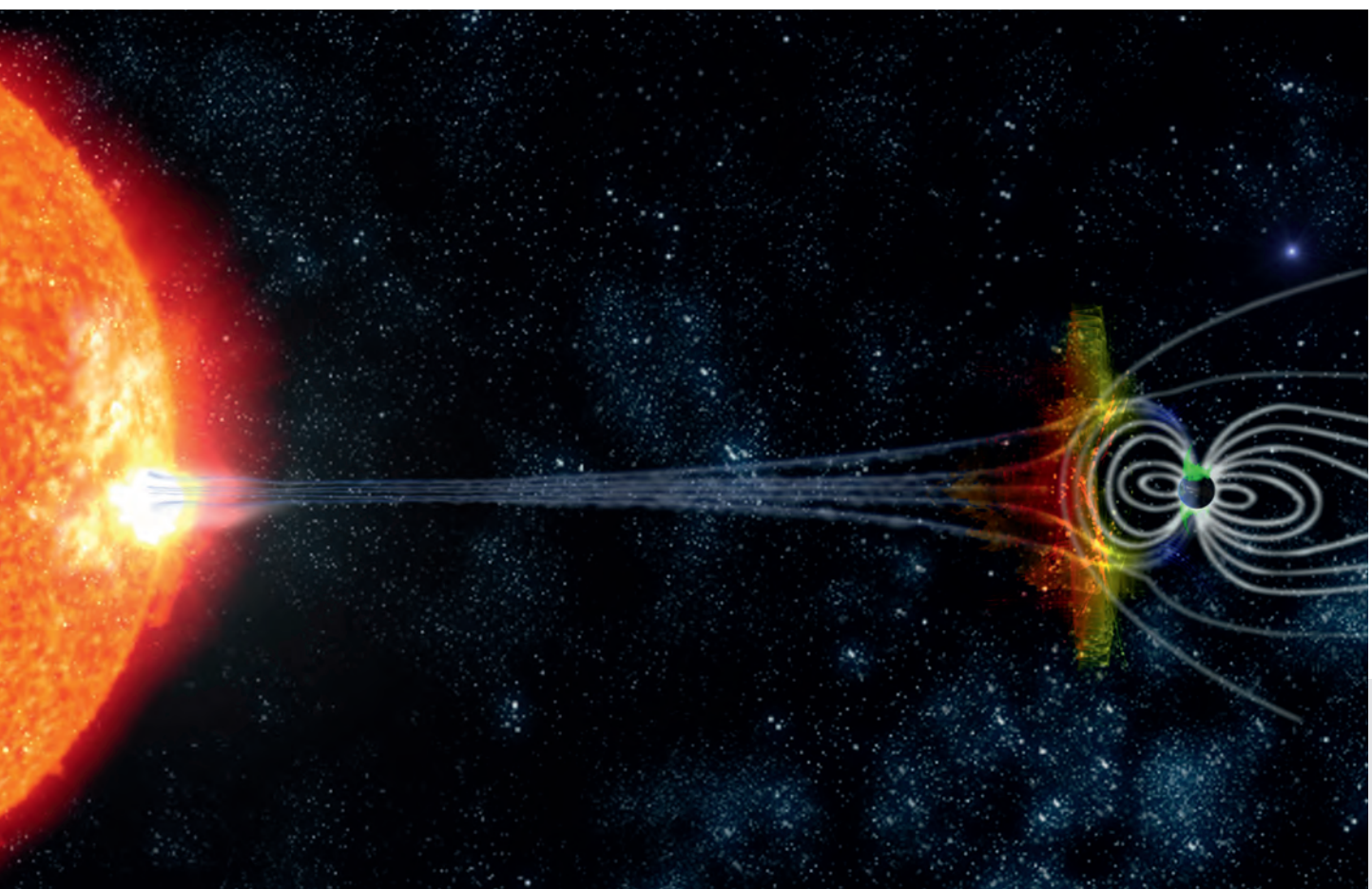


Variabilität des Erdmagnetfelds im Holozän

Monika Korte und Ute Frank

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

The geomagnetic field shields our habitat against solar wind and galactic cosmic rays. Since the magnetic shielding influences cosmic ray induced ionization of the atmosphere on centennial time-scales, it might have effects on cloud formation and consequently climate. In order to identify possible links between geomagnetic variations and climate change, which are controversially discussed, good global geomagnetic field reconstructions on multi-centennial to millennial time-scales are a prerequisite to interpret records of climate change. Scientists from GFZ together with collaborators from the US, Switzerland and Great Britain have worked on millennial scale magnetic field models for nearly 10 years. A first model spanning the past 10 kyrs, the Holocene, was published last year. The resolution and accuracy of the model is still limited due to data distribution and quality, but higher resolution models for the past 3 kyrs are feasible and have been published previously. These models provide continuous descriptions of dipole moment and tilt variations through the Holocene and of the global field intensity distribution, which all are relevant to estimate the magnetic shielding effect.



Unser Planet wird von einem gigantischen Schutzschild umgeben, der Magnetosphäre. Sie wird durch das Erdmagnetfeld gebildet, welches durch Geodynamoprozesse im äußeren Erdkern entsteht. Das Erdmagnetfeld kann als ein gegenüber der Rotationsachse der Erde um 11° geneigtes Dipolfeld beschrieben werden. Nahe der Erdoberfläche sind jedoch regionale und temporale Unterschiede in Feldstärke und Feldrichtung zu beobachten.

Die Magnetosphäre schirmt die Erde und die sie umgebende Atmosphäre vor Sonnenwind und kosmischer Strahlung ab. Deutlich bemerkbar macht sich die Abschirmwirkung in den Gebieten, wo die Magnetosphäre am schwächsten ist, wie z. B. in der Nähe der Magnetpole: Bei Sonnenstürmen können die hochenergetischen Partikel hier entlang der magnetischen Feldlinien bis weit in die Atmosphäre vordringen. Die Folgen sind nicht nur eindrucksvolle Polarlichter, sondern oft auch Stromausfälle, Ausfälle von Satelliten und hohe Strahlenbelastung für Flugpassagiere. Aber auch im südlichen Atlantik, zwischen Brasilien und Südafrika, existiert ein Gebiet mit geringer Magnetfeldstärke. Sie ist dort bis zu 40 % schwächer als in vergleichbaren Breiten und damit weltweit am geringsten. Ob bzw. in welchem Maß es Zusammenhänge zwischen Änderungen des Erdmagnetfelds und Klimaschwankungen gibt, ist eine Frage, der sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ widmen. Ein möglicher Prozess, bei dem das Erdmagnetfeld über Jahrhunderte und länger eine Rolle für Klimaänderungen spielen könnte, ist die Ionisierung der Atmosphäre durch kosmische Strahlung. Es wird davon ausgegangen, dass die Stärke der Ionisierung Einflüsse auf die Aerosol- und damit auf potentielle Wolkenbildung hat – mit direkten Auswirkungen auf das Klima: So könnte z. B. eine erhöhte Strahlung infolge erhöhter Sonnenaktivität zu Zeiten eines schwächeren Magnetfelds in bestimmten Gebieten zu stärkerer Wolkenbildung und damit zu einem kälteren und feuchteren regionalen Klima führen. Zuverlässige Beschreibungen der globalen und regionalen Änderungen des Erdmagnetfelds in der Vergangenheit sind somit eine wichtige Voraussetzung, um einen Zusammenhang zwischen Schwankungen in der Magnetfeldstärke und Klimavariationen nachzuweisen oder zu widerlegen.

Links: Künstlerische (nicht maßstabsgerechte) Darstellung der Magnetosphäre im Sonnenwind

Left: Artist view (not to scale) of the magnetosphere in the solar wind



Kontakt: Kontakt: M. Korte
(monika@gfz-potsdam.de)



Abb. 1: Messung von Sedimentproben im paläomagnetischen Labor des GFZ

Fig. 1: Measurements of sediment samples in the paleomagnetic laboratory of the GFZ

Die direkten Messreihen des Erdmagnetfelds reichen nur wenige hundert Jahre zurück und geben daher nur einen unvollständigen Ausschnitt der zum Teil deutlich längerfristigen Schwankungszyklen wieder. Mit gesteinsmagnetischen Methoden können sehr viel ältere „paläomagnetische“ Daten gewonnen werden. Sedimente und Gesteine, wie z. B. Vulkanite, konservieren die Richtung und die Stärke des Erdmagnetfelds zur Zeit ihrer Entstehung. Auch archäologische Fundstücke eignen sich für diese Methode. Im paläomagnetischen Labor des GFZ (Abb. 1) wird so das Erdmagnetfeld verschiedener Epochen und für verschiedene Regionen rekonstruiert. Messwerte für den Zeitraum des Holozäns, das in Europa die vergangenen 11 560 Jahre umfasst, sind wegen der hohen Dichte der Magnetfeld- und Klimadaten gut geeignet, Schwankungen im Bereich von Jahrhunderten bis Jahrtausenden zu untersuchen.

Paläomagnetische Magnetfeldmodelle

Seit zehn Jahren erarbeiten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des GFZ gemeinsam mit Kolleginnen und Kollegen aus den USA, Frankreich, der Schweiz und Großbritannien eine Datenbank mit allen weltweit über die letzten Jahrzehnte publizierten Magnetfelddaten des Holozäns (Donadini et al., 2010). Mit Hilfe dieser Daten können hochauflösende globale paläomagnetische Magnetfeldmodelle, also Modelle, die vergangene Epochen beschreiben, erstellt werden.

Zur Beschreibung des globalen Magnetfelds und seiner regionalen Heterogenität dient die Kugelfunktionsanalyse. Damit werden aus den Messdaten von modernen Satelliten, Observatorien oder auch aus paläomagnetischen Laboren Magnet-

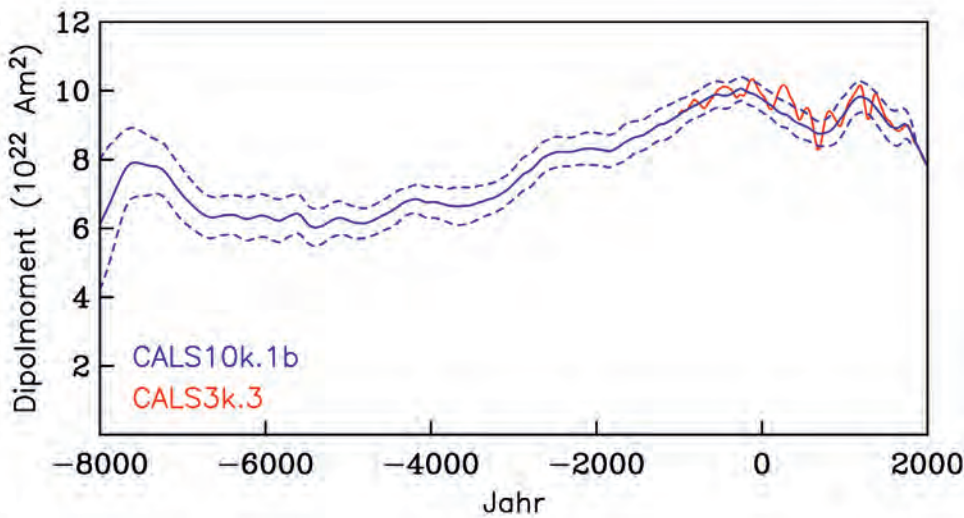
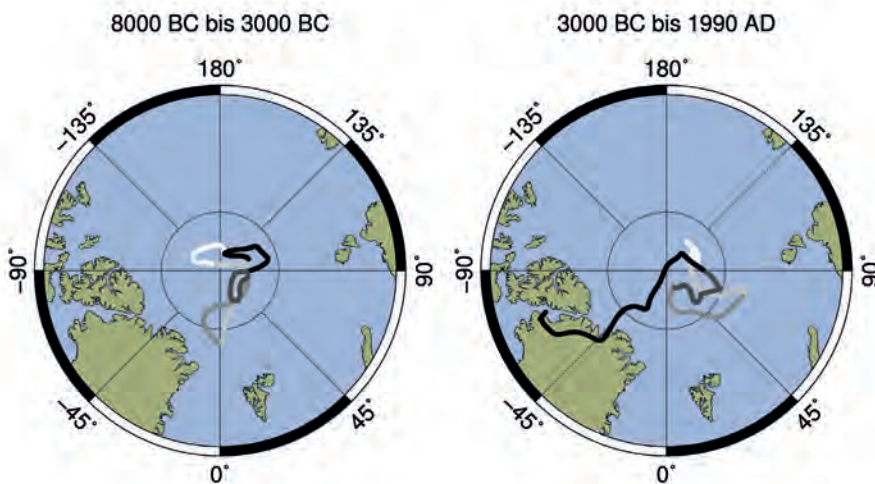


Abb. 2: Das magnetische Dipolmoment (oben) nimmt seit etwa 1000 Jahren deutlich ab, war jedoch während des Holozäns auch über mehrere Jahrtausende niedriger als heute. Das längere CALS10k.1b-Modell (blau) zeigt aufgrund der stärkeren Glättung weniger zeitliche Variabilität als CALS3k.3 (rot). Die Dipolachse neigte sich über die letzten 10 000 Jahre in alle Richtungen (unten, zeitliche Abfolge von weiß nach schwarz für erste und zweite Hälfte des Zeitintervalls).

Fig. 2: The magnetic dipole moment (upper panel) has been clearly decreasing for about 1000 years. However, it also has been lower than today for several thousand years during the Holocene. The longer term model CALS10k.1b (blue) shows less temporal variability than CALS3k.3 (red) due to stronger smoothing requirements. The dipole axis tilted in all directions over the past 10 000 years (lower panel, time-line from white to black for first and second half of the time interval).



feldmodelle gewonnen, mit deren Hilfe Stärke und Richtung des Felds an jedem beliebigen Ort und zu jedem Zeitpunkt innerhalb des betrachteten Zeitraums bestimmt werden können. Das GFZ entwickelt seit 2003 sehr erfolgreich gemeinsam mit internationalen Partnern aus den USA, der Schweiz und Großbritannien Magnetfeldmodelle für den Zeitraum der letzten Jahrtausende. Einen Überblick über diese Modelle gibt die GFZ-Website: <http://www.gfz-potsdam.de/portal/gfz/Struktur/Departments/Department+2/sec23/topics/models/CALSxk>

Obwohl die Modellierungsmethode die gleiche ist wie für aktuelle Messdaten, bestehen große Unterschiede in der räumlichen und zeitlichen Auflösung sowie in der Genauigkeit der paläomagnetischen Modelle. Aktuelle Magnetfeldmodelle beschreiben kleinräumige Strukturen des Hauptfelds bis zu den Kugelfunktionsgraden zwischen etwa 13 und 15, ab diesem Grad dominieren die Felder magnetisierter Gesteine in der Erdkruste, und zeitliche Variationen in der Größenordnung ab Monaten. Für die letzten Jahrtausende werden aufgrund der

schlechteren globalen Datenverteilung, der teilweise großen Unsicherheiten in den Daten sowie deren Datierung effektiv nur Auflösungen von Kugelfunktionsgrad 4 bis 5, sowie Variationen ab 50 bis 200 Jahren erreicht. Im Jahr 2011 konnte am GFZ zum ersten Mal ein Magnetfeldmodell für die letzten zehn Jahrtausende entwickelt werden (Korte et al., 2011). Da einige Daten von Sedimenten mit relativ großen Unsicherheiten verbunden sind, liefert dieses Modell zunächst nur eine räumlich und zeitlich geglättete Beschreibung. Für die letzten drei Jahrtausende sind die Unsicherheiten deutlich geringer und daher ist das Modell CALS3k.3 (Korte et al., 2009) detaillierter.

Entwicklung des Magnetfelds während des Holozäns

Die Feldmodelle liefern Informationen zur Änderung der Stärke und Neigung des Dipolfelds sowie zu regionalen Unterschieden. Abbildung 2 zeigt, dass die derzeitige starke Abnahme des magnetischen Dipolmoments im Rahmen der generellen

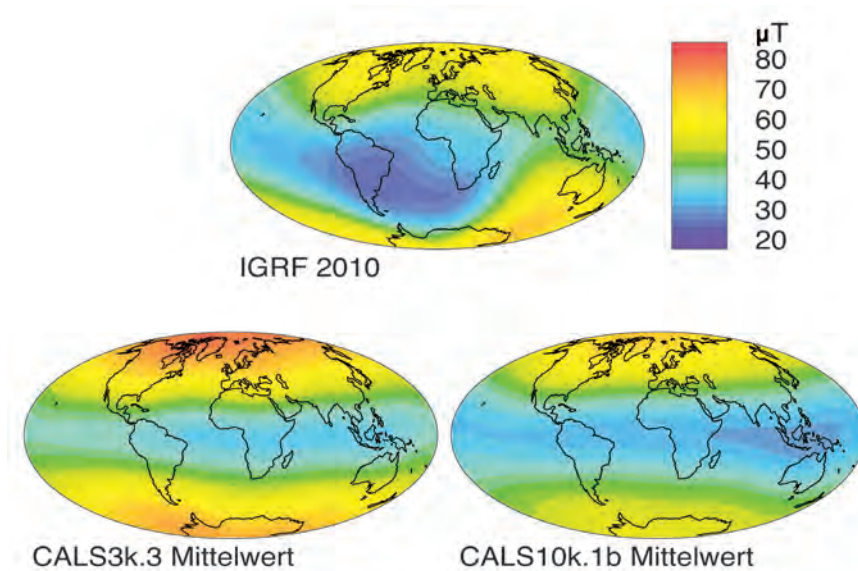


Abb. 3: Verteilung der magnetischen Feldstärke an der Erdoberfläche heute (oben) und gemittelt über die letzten drei (unten links) bzw. zehn (unten rechts) Jahrtausende. Im heutigen Erdmagnetfeld ist die südatlantische Anomalie als deutliche Schwächezone erkennbar.

Fig. 3: Distribution of magnetic field intensity at the Earth's surface today (upper panel) and as average over the past three (bottom left) and ten (bottom right) millennia. The South Atlantic Anomaly is clearly visible as a weak zone in the current field.

Schwankungen während des Holozäns liegt und nicht notwendigerweise auf den Beginn einer Feldumkehr hindeutet, wie teilweise spekuliert wird. Trotzdem kann eine weitere Abnahme aufgrund der dann abgeschwächten Abschirmung gegen kosmische Strahlung und Sonnenwind zu großen Problemen für die moderne Technik führen. Während starker Sonnenaktivität sind z. B. Ausfälle von Satelliten oder Stromausfälle auch in mittleren Breiten zu erwarten. Aufgrund der Abhängigkeit der modernen Gesellschaft von diesen Technologien besteht hier eine hohe Vulnerabilität. Die Ergebnisse moderner geomagnetischer Forschung können helfen, den Geodynamoprozess im Erdkern besser zu verstehen und so künftige Magnetfeldänderungen vorherzusagen.

Die Neigung der Dipolachse änderte sich in den letzten 10 000 Jahren ständig und ohne eine bevorzugte Richtung (Abb. 2). Dass die im Modell beschriebenen Neigungswinkel für den gesamten Zeitraum deutlich kleiner als die heutigen 11° sind, könnte an der begrenzten zeitlichen Auflösung des Modells liegen und sollte nicht als ungewöhnlich starke Neigung der aktuellen Dipolachse interpretiert werden. Diese Variationen in der Dipolneigung sind sehr bedeutend, haben sie doch Auswirkungen auf die regionale Ionisation der Atmosphäre auf Zeitskalen von Jahrhunderten und länger (Usoskin et al., 2008) und somit möglicherweise Einfluss auf das Klima (Usoskin 2010).

In der Karte der heutigen Magnetfeldstärke ist die Südatlantische Anomalie als deutliche Schwächezone zu erkennen (Abb. 3). Die paläomagnetischen Modelle zeigen, dass dieses Gebiet geringster Feldstärke während der letzten Jahrtausende ebenfalls deutlichen Schwankungen unterworfen war und im Mittel offenbar weiter östlich lag als heute. Auch diese Änderungen können zur Untersuchung von Wechselwirkungen sowie einem besseren Verständnis zukünftig zu erwartender Magnetfeldänderungen genutzt werden. Aktuell werden weitere Daten in Afrika und Südamerika mit Beteiligung des GFZ erhoben, um diese Ergebnisse zu verifizieren.

Ausblick

Globale paläomagnetische Feldmodelle ermöglichen es, die Abschirmwirkung des geomagnetischen Felds während der letzten Jahrtausende zu charakterisieren und generelle Informationen über den Geodynamoeffekt im tiefen Erdinneren zu liefern. Die bisher international verfügbaren Modelle weisen jedoch aufgrund der Datenbasis und -qualität noch große Unsicherheiten auf. Es werden daher weitere Verbesserungen angestrebt, um den Geodynamo im Hinblick auf eine Vorhersage kommender Magnetfeldänderungen besser zu verstehen, mögliche Zusammenhänge zwischen Magnetfeld und Klima aufzuzeigen und damit Aussagen zu Wirkungen auf das System Erde-Mensch einschließlich dem Schutz sensibler Infrastrukturen zu verbessern. In jüngerer Vergangenheit publizierte Daten, ein wachsendes Verständnis der Datenqualität sowie eine Weiterentwicklung der Modellierungsmethoden tragen dazu bei, dieses Forschungsziel zu erreichen.

Literatur

- Donadini, F., Korte, M., Constable, C. (2010): Millennial variations of the geomagnetic field: from data recovery to field reconstruction. - *Space Science Reviews*, 155, 1-4, 219-246, 10.1007/s11214-010-9662-y.
- Korte, M., Donadini, F., Constable, C. G. (2009): Geomagnetic field for 0–3 ka: 2. A new series of time-varying global models. - *Geochemistry Geophysics Geosystems (G3)*, 10, Q06008, 10.1029/2008GC002297.
- Korte, M., Constable, C., Donadini, F., Holme, R. (2011): Reconstructing the Holocene geomagnetic field. - *Earth and Planetary Science Letters*, 312, 3-4, 497-505, 10.1016/j.epsl.2011.10.031.
- Usoskin, I. G., Korte, M., Kovaltsov, G. A. (2008): Role of centennial geomagnetic changes in local atmospheric ionization. - *Geophysical Research Letters*, 35, L05811, 10.1029/2007GL033040.
- Usoskin, I. G., Mironova, I. A., Korte, M., Kovaltsov, G. A. (2010): Regional millennial trend in the cosmic ray induced ionization of the troposphere. - *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 72, 1, 19-25, 10.1016/j.jastp.2009.10.003.