

Klimainformation aus dem Untergrund?

Es ist schon seit langem bekannt, dass sich eine Änderung der Oberflächentemperatur („ground surface temperature“, GST) unterirdisch nachweisen lässt. Bereits 1934 publizierten die Bergbauingenieure *Hotchkiss* und *Ingersoll* eine Studie, in der sie versuchten, die Entwicklung seit der letzten Kaltzeit aus ihren Temperaturmessungen zu rekonstruieren. Ihre Ergebnisse (vgl. Abb. 1a) entsprechen sicher nicht dem, was heute erreicht werden kann. Erstaunlicherweise wurden jedoch die generelle Form und zeitliche Ausdehnung der letzten Kaltzeit durchaus korrekt geschätzt. Und tatsächlich behandelt dieser außerordentlich klarsichtige Artikel die meisten der bis heute diskutierten Zusammenhänge von Klima und Untergrundtemperatur. In den folgenden Jahrzehnten geriet die Idee von *Hotchkiss* und *Ingersoll* weitgehend in Vergessenheit, um erst in den 1980er Jahren neues Interesse zu finden.

Während einer Untersuchung von Bohrlochtemperaturen und Permafrost an der Nordküste Alaskas fanden *Lachenbruch* und *Marshall* (1986; vgl. Abb. 1b), dass die meisten ihrer Bohrlochprofile in geringer Tiefe charakteristische „Haken“ aufwiesen, die von ihnen unmittelbar als Folge einer rezenten Erwärmung erkannt wurden. Diese Beobachtung fiel in eine Zeit wachsen-

der Sorge vieler Wissenschaftler, dass die zunehmende CO₂-Konzentration der Atmosphäre zu einer generellen Veränderung des Klimas führen würde (Schaffung des Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, im Jahr 1988).

Es wurden zunächst große Hoffnungen in die Methode der „borehole climatology“ gesetzt: Bohrungen sind fast überall zu finden (vgl. Foto 1), Temperaturen leicht zu messen und die Beziehung zwischen



Foto 1: Bohrlochmessungen im Guadarrama-Gebirge im Norden von Madrid (Spanien)

Foto: V. Rath

der Änderung der Oberflächentemperatur und der rezenten Borlochtemperatur physikalisch einfach. Dies führte zur Zusammenstellung einer entsprechenden Datenbank durch Pollack et al. (1998), die in der Paläoklima-Datenbank der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA; www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data/datasets/borehole) zugänglich sind. Diese Daten bildeten die Grundlage für eine Reihe von Studien, die im Wesentlichen auf eine Rekonstruktion der mittleren Temperatur der Nordhalbkugel abzielten (z.B. Harris und Chapman 2001, vgl. Abb. 1c). Die Ergebnisse dieser Studien waren zu diesem Zeitpunkt umstritten, da sie eine größere Variation der Temperatur zeigten als andere Rekonstruktionsmethoden (wie etwa Baumringe) – ein bis heute nicht völlig gelöstes Problem.

Wissenschaftler, die sich mit der Untersuchung der geothermischen Verhältnisse im Untergrund beschäftigten, erkannten schnell, dass der Effekt des Paläoklimas eine mögliche Verzerrung der geschätzten geothermischen Gradienten darstellten: Heute ist eine „Paläoklimakorrektur“ eine Standardmethode der Geothermik. Für eine umfassende Darstellung aller Aspekte und bisherigen Forschungsarbeiten sei auf den umfangreichen Review-Artikel von González Rouco et al. (2009) und die Monographie von Bodri und Cermak (2007) verwiesen. Im Folgenden werden zunächst die Grundlagen dieser paläoklimatischen Methode vorgestellt, gefolgt von einer Diskussion der damit verbundenen Annahmen und Probleme.

Physikalischer Hintergrund

In der Bohrloch-Klimatologie wird die Wärmeleitung bzw. Wärmediffusion als zugrunde liegender physikalischer Prozess genutzt. Fourier hat diesen Vorgang in seine berühmte Gleichung gefasst, in welcher der Wärmestrom mit dem Temperaturgefälle in Beziehung gesetzt wird (vgl. Abb. 2). Die Wärme strömt also immer vom wärmeren zum kälteren Bereich des Körpers. Ändert sich an den Randbedingungen, also T_1 und T_2 in der Abb. 2 nichts, so stellt sich ein zeitlich konstanter Temperaturverlauf ein. Der bestimmende thermische Parameter des Körpers ist in diesem Fall die Wärmeleitfähigkeit. Finden aber an der einen oder an beiden Seiten des betrachteten Körpers zeitliche Änderungen der Temperatur statt, so diffundieren diese Änderungen unter zeitlicher Verzögerung und zunehmenden Abschwächung in den Körper hinein. Für diese instationären Prozesse ist als Parameter die thermische Diffusivität bestimmend.

Diese Betrachtungen können nun auf den Untergrund angewandt werden: Generell nimmt die Temperatur mit zunehmender Tiefe zu, in Mitteleuropa beträgt dieser geothermische Gradient typischerweise 30 K pro km. Die Erde besitzt immer noch eine Restwärme aus ihrer Entstehungszeit, zusätzlich wird durch radioaktiven Zerfall in der Erdkruste ständig neue Wärme produziert. Das Erdinnere stellt also den wärmeren Bereich da, während die Erdoberfläche die „kal-

te Seite“ ist. Daher erreicht ein ständiger Wärmestrom aus dem Innern der Erde die Oberfläche. Der global durchschnittliche Wert für die kontinentalen Gebiete wird momentan auf etwa 70 mW m^{-2} geschätzt (Davies und Davies 2010).

Wäre die Oberflächentemperatur immer konstant und gäbe es keine weiteren Prozesse, welche den Wärmetransport beeinflussen, so würde sich ein stationärer Wärmestrom ergeben und der geothermische Gradient wäre konstant, die Temperatur würde also linear mit der Tiefe ansteigen. Dies ist selbstverständlich nicht der Fall, die Temperaturen an der Erdoberfläche ändern sich auf verschiedenen zeitlichen Skalen, von kurzfristigen wie den Tag- und Nachtzyklen bis zu langfristigen Klimaschwankungen. All diese Änderungen diffundieren in den Untergrund, welcher deshalb ein „Gedächtnis“ für vergangene Temperaturen darstellt.

Dabei gilt wieder die dem Diffusionsprozess charakteristische Eigenschaft, dass mit zunehmender Tiefe die Signale verschmieren und schwächer werden. Je länger die Signale zurückliegen, desto tiefer sind sie in den Untergrund eingedrungen und desto schwächer werden sie. Eine ganz praktische Nutzung dieses Prozesses wurde früher zur Kühlung von Lebensmitteln herangezogen: Das Kältesignal des Winters ist im darauffolgenden Sommer in wenigen Metern Tiefe zu finden, so dass in geeigneten Kellern Lebensmittel in der warmen Jahreszeit durch den Effekt des vorangegangenen Winters gekühlt werden können.

Ältere Signale von hundert bis zu einigen zehntausend Jahren finden sich in entsprechenden größeren Tiefen, diese reichen bis weit über 1000 m. Abb. 3 zeigt qualitativ, in welchen Tiefen die verschiedenen Temperaturänderungen der Vergangenheit ihre Signaturen hinterlassen haben. Diese Klimaschwankungen sind mit unterschiedlichen Ereignissen verbunden, deren quantitative Rekonstruktion von besonderem Interesse sind: von der aktuellen Klimaerwärmung über die kleine Eiszeit und das mittelalterliche und holozäne Klimaoptimum bis zum Höhepunkt der letzten Eiszeit. Je weiter die Temperaturänderungen in der Zeit zurückliegen, desto geringer wird jedoch die Auflösung. Hat eine solche Änderung weniger als 100 Jahre gedauert, so kann sie nur bis Anfang des 18. Jhs. zurückverfolgt werden. Für das frühe Mittelalter beträgt die Auflösung bereits nur noch mehrere hundert Jahre. Veränderungen auf glazialer Skala können schließlich nur noch erfasst werden, wenn sie mehrere tausend Jahre angehalten haben.

Auf Grund der Physik des Wärmetransports ist die Methode nicht geeignet eine hohe zeitliche Auflösung (wie etwa Baumringe) zu erreichen. Trotzdem können die Mittelwerte über entsprechende Zeitintervalle durchaus nützlich sein, um Temperaturverläufe gemeinsam mit anderen Proxymethoden verlässlicher zu bestimmen. In Abb. 4 sind beispielhaft gemessene Temperaturdaten aus zwei verschiedenen Regionen dargestellt. Abb. 4a zeigt wiederholte, innerhalb eines Jahres gemessene Temperaturprofile im Permafrost in

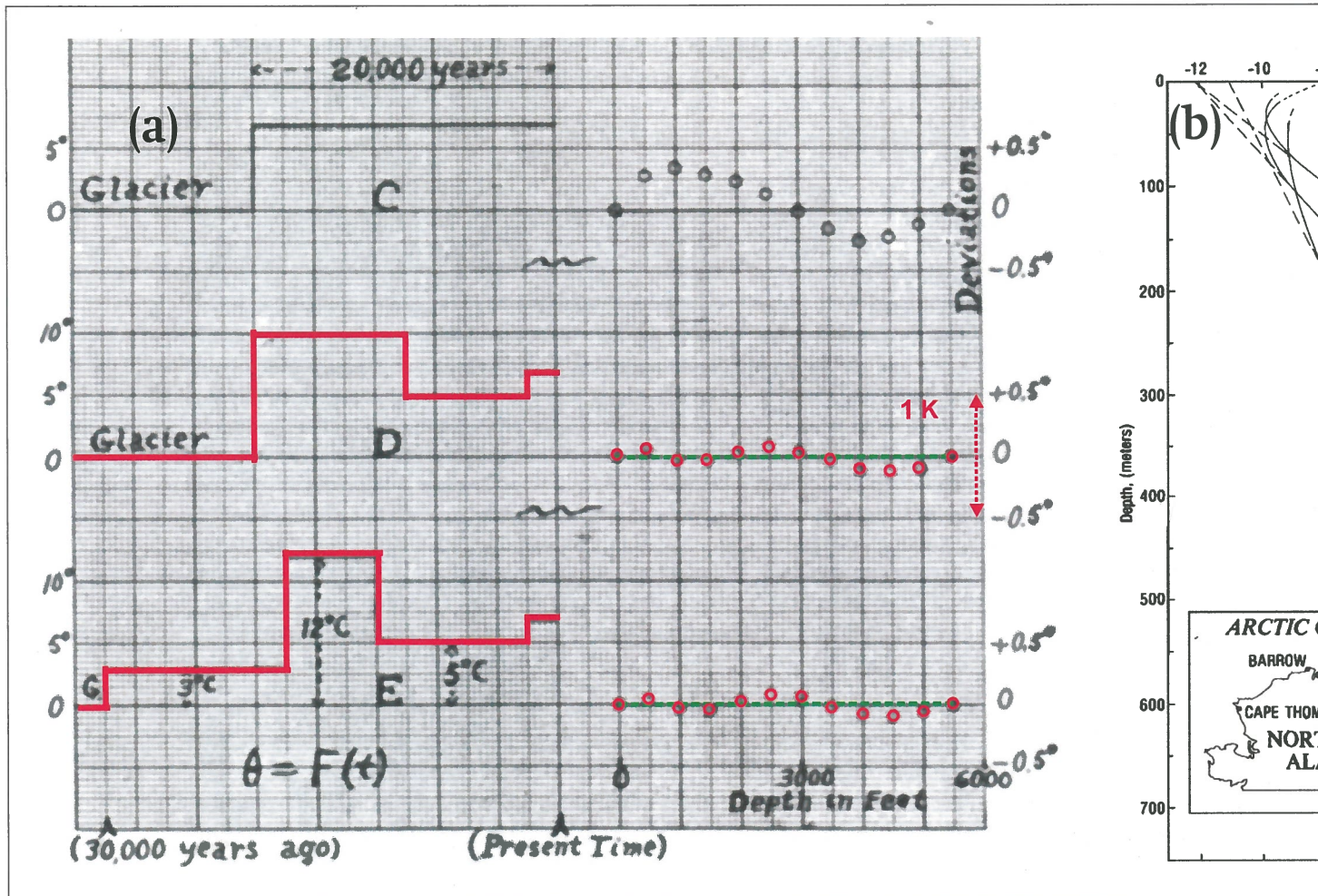


Abb. 1: Geschichte der Bohrloch-Klimatologie:

(a) Erster Versuch der Rekonstruktion von Paläo-Temperaturen aus Untergrundmessungen durch *Hotchkiss* und *Ingersoll* (1934). Hervorhebungen durch die Autoren.

(b) Bohrlochtemperaturen in der Umgebung von Prudhoe Bay, Alaska (*Lachenbruch et al. 1982*).

(c) Bohrlochtemperaturen der Nordhalbkugel (*Harris und Chapman 2001*).

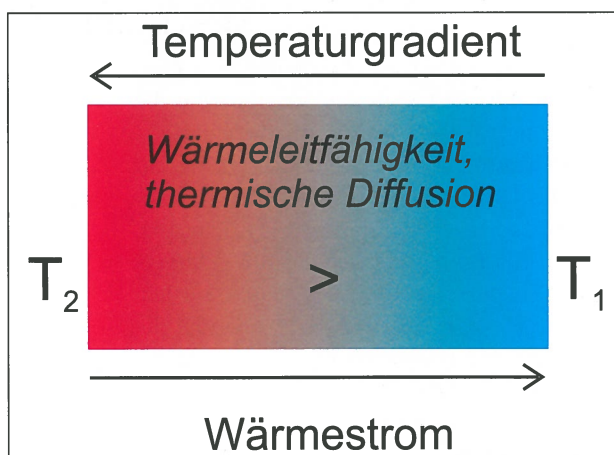


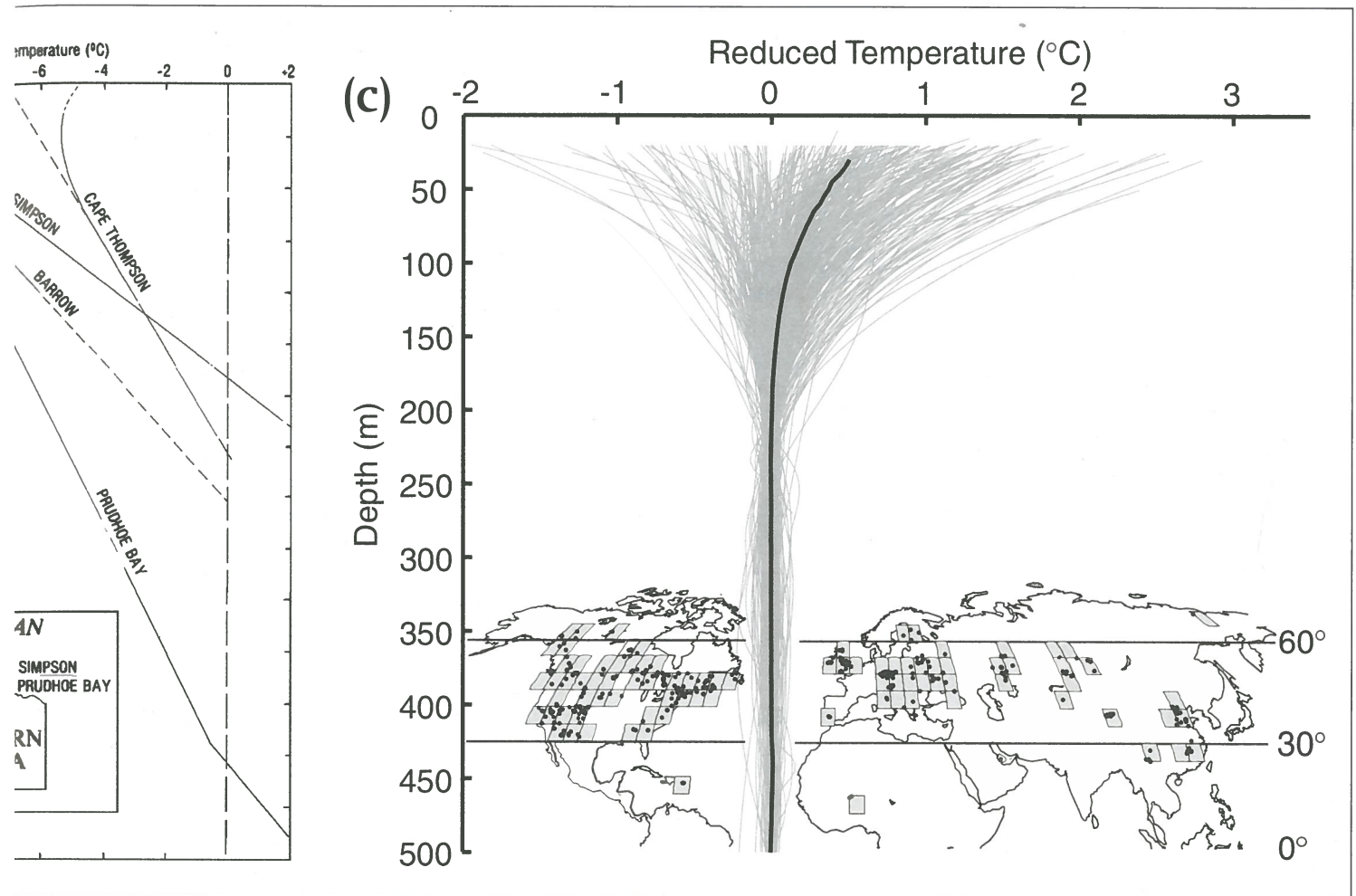
Abb. 2: Weist ein Körper an der einen Seite eine höhere Temperatur (T_2) auf als auf der anderen Seite (T_1), so stellt sich ein Wärmestrom in Richtung kalter Seite ein. Der Temperaturgradient zeigt per definitionem immer in Richtung der höheren Temperaturen. Die den Wärmestrom bestimmenden Parameter des Körpers sind Wärmeleitfähigkeit und thermische Diffusion.

Nordostsibiriens (am See El'gygytyn). Die jahreszeitliche Temperaturschwankung in den oberen 15-20 m ist gut zu erkennen. In tieferen Bereichen gibt es keine Beeinflussung durch die „Jahreswelle“ mehr, es ist je-

doch eine flache Krümmung zu erkennen, welche in diesem Fall auf die Abkühlung während der kleinen Eiszeit und die rezente Klimaerwärmung zurückgeführt werden konnten (Mottaghy et al. 2013). In Abb. 4b werden Daten aus einer tiefen Bohrung in Polen gezeigt. Dort erkennt man deutlich eine langgezogene Krümmung, welche durch die tiefen Temperaturen während des letzten glazialen Maximums und der anschließenden Erwärmung verursacht wurde.

Methoden der Rekonstruktion

Die Rekonstruktion paläoklimatischer Temperaturänderungen aus Bohrmessungen stellt also an die Methoden besondere Anforderungen, da verschiedenste Einflüsse und unbekannte Parameter berücksichtigt werden müssen. Zunächst einmal muss der grundsätzliche Weg von der Messung zu den rekonstruierten Temperaturen erläutert werden. Das Ziel ist es, von Temperaturmessungen in Bohrlöchern auf Temperaturänderungen an der Erdoberfläche zurückzuschließen, es handelt sich also um ein so genanntes „inverses“ Problem. Das „Vorwärtsproblem“ ist die Beschreibung des Diffusionsprozesses in den



Untergrund bei vorgegebenen Temperaturänderungen an der Oberfläche. Abb. 5 verdeutlicht dies schematisch.

Bei den Inversionsmethoden gibt es eine Reihe verschiedener Ansätze. Hier seien zwei grundsätzlich verschiedene Ansätze erwähnt. Dies sind einerseits deterministische Methoden, die eine Optimierung hinsichtlich der Abweichung zwischen simulierten und gemessenen Daten darstellen. Diesen stehen die stochastischen Verfahren gegenüber: Hier wird nicht das im genannten Sinne optimale Modell gesucht, sondern eine statistische *a posteriori*-Verteilung der untersuchten Parameter gewonnen. Bei einer Monte Carlo-Inversion werden sehr viele verschiedene Vorwärtsmodelle berechnet, wobei die zugehörigen Parameter, in diesem Fall also die Temperaturänderungen an der Oberfläche, zufällig variiert werden. Idealerweise werden in dem betrachteten Zufallsraum alle tatsächlich möglichen Modelle erfasst. In der Praxis ist dies jedoch kaum möglich.

Beide Ansätze erfordern *a priori*-Informationen, die in den Schätzprozess eingehen. Diese können physikalisch begründet sein wie etwa Annahmen über zeitliche Korrelationen der Bodentemperaturen oder quasi-philosophische Forderungen wie eine größtmögliche Einfachheit des Modells (Occams Prinzip), wie auch immer sie definiert sein mag. In den Geowissenschaften stellt sich fast immer das Problem, dass mehr unbekannte Parameter das System beschreiben, als sich eindeutig

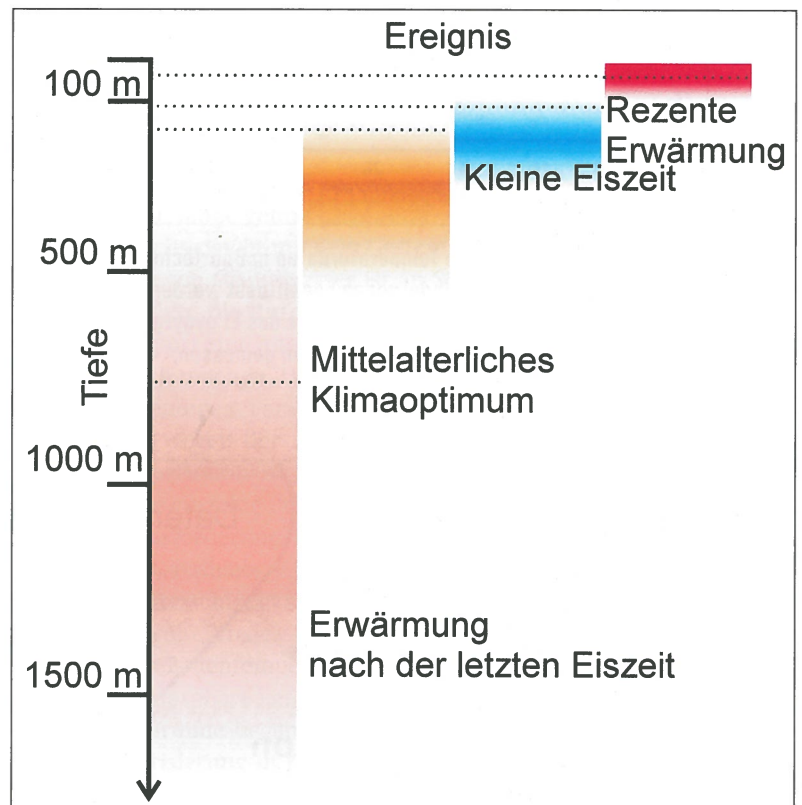


Abb. 3: Qualitativer Zusammenhang zwischen den vergangenen Temperaturänderungen an der Erdoberfläche und den Tiefenlagen, in welchen sich diese im Temperatursignal zeigen. Je dunkler die Farbe, desto stärker ist das Temperatursignal in der entsprechenden Tiefe.

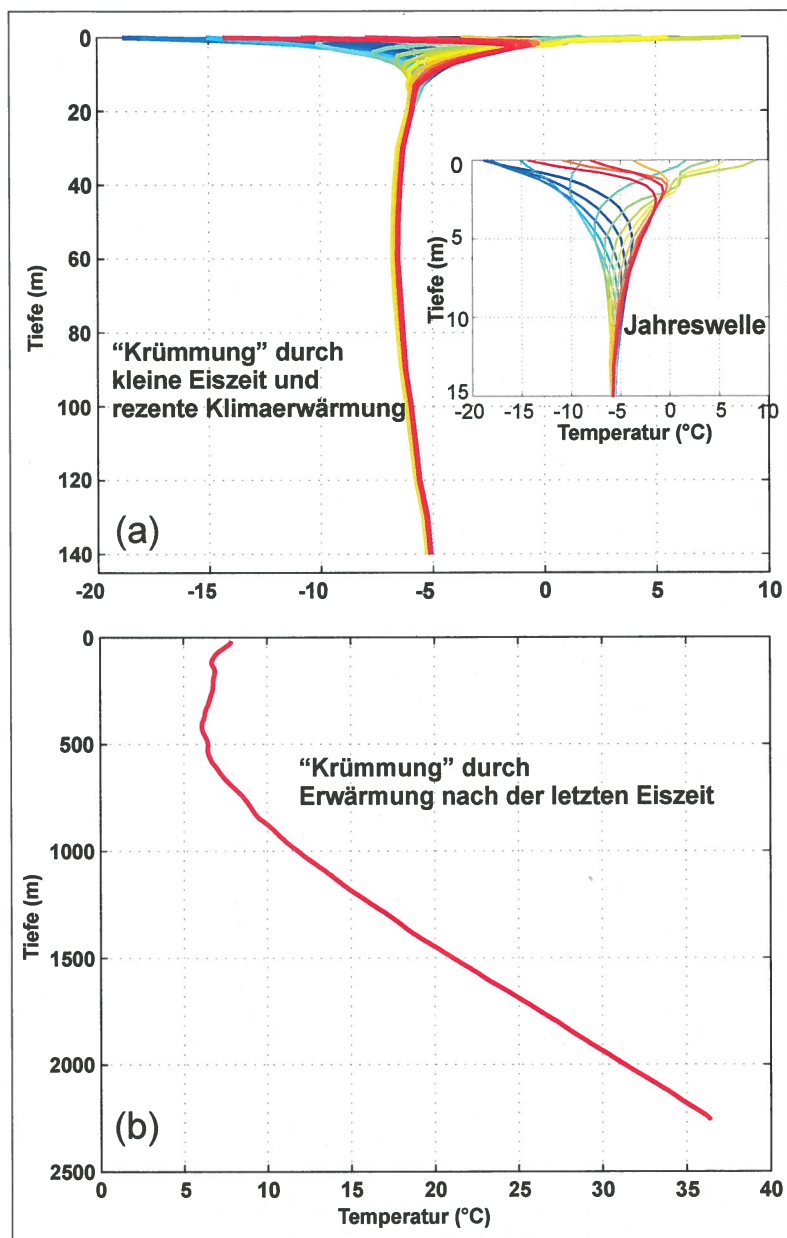


Abb. 4: Beispieldaten für gemessene Temperaturdaten in Bohrlöchern, welche durch paläoklimatische Temperaturänderungen beeinflusst wurden. (a) zeigt Messungen in einem Forschungsbohrloch in der Nähe des El'gygytyn-Sees in Ostsibirien; (b) wurde in einem Bohrloch in Nordpolen gemessen.

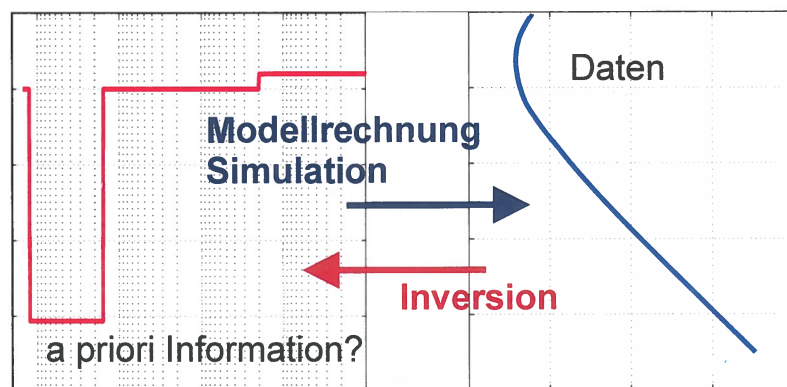


Abb. 5: Schematische Darstellung der Inversionsmethode. Aus gemessenen Daten (Profilen der Bohrlochtemperatur) werden Bodentemperaturverläufe in der Vergangenheit rekonstruiert.

aus den gemessenen Daten bestimmen lassen. Mathematisch ausgedrückt ist dies ein „schlecht gestelltes Problem“. Dies führt oft zu mehreren gleichwertigen Modellen für einen paläoklimatischen Verlauf, welche auf das Vorwärtsproblem angewandt zu den gleichen Daten, also den gleichen gemessenen Temperaturen, führen. Diese Mehrdeutigkeit kann unter anderem durch *a priori*-Informationen, also durch Vorwissen über mögliche Klimaverläufe, reduziert werden. Hierbei können zum Beispiel Modelle beitragen, welche aus anderen Klimaarchiven gewonnen wurden.

Besondere Berücksichtigung verdienen vor allem zwei Aspekte: Zunächst ist jede Rekonstruktion nur so gut wie das zu Grunde liegende mathematische Modell. Werden wichtige Prozesse nicht im Modell erfasst, führt dies im Allgemeinen zu systematisch verzerrten Ergebnissen. Ein Beispiel hierfür ist etwas der Gefrier- und Tauprozess in arktischen Gebieten. Weiterhin ist es von entscheidender Bedeutung, sich über die Rolle der *a priori*-Informationen im Klaren zu sein. Inversionsmethoden stellen oft eine Vielzahl an Methoden bereit, mit denen ihr quantitativer Einfluss untersucht werden kann. Beide hier genannten Problembereiche erfordern, dass eine Inversion nicht nur einmalig erfolgt, sondern von umfangreichen Untersuchungen der genannten Einflüsse begleitet werden muss, wie etwa Variationen des benutzten Simulationsmodells und der *a priori*-Information.

Das Ziel aller Bemühungen in der Rekonstruktion von Paläoklimaverläufen ist eine Konfrontation der gewonnenen Ergebnisse mit anderen Schätzungen oder den Ergebnissen von Klimamodellierungen. Dies kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Einerseits können die Ergebnisse der Rekonstruktion (Inversion) mit anderen Temperaturschätzungen verglichen werden, andererseits können Temperaturen unterschiedlicher Herkunft durch die entsprechende Vorwärtsmodellierung in Pseudobeobachtungen (also synthetische Bohrlochprofile) umgerechnet werden. Der Vergleich erfolgt hier also auf der Ebene der Beobachtungen. Beide Ansätze haben ihre Berechtigung und weisen spezifische Vorteile und Nachteile auf, auf die hier jedoch nicht tiefer eingegangen werden kann.

Interpretation von Bohrlochtemperaturen

Abb. 6 liefert ein Beispiel einer erfolgreichen Rekonstruktion von vergangenen Temperaturänderungen. Es handelt sich hier um die 2500 m tiefe Forschungsbohrung in Outokumpu (Finnland), die wegen des umfangreichen Messprogramms besonders gute Bedingungen für eine paläoklimatische Untersuchung aufweist. In schwarz sind hier die Ergebnisse einer deterministischen Inversion zu sehen, die die Beobachtungen mit einer maximalen Abweichung von 0,05 K anpassen. In diesem Fall wurde ein Einfachheitskriterium in der Regularisierung verwendet. Sie werden ergänzt durch eine pollenbasierte Rekonstruktion aus Sedimenten eines nahegelegenen Sees (Heikkilä und Seppä 2003) sowie die europaweite Multiproxy-Rekonstruktion von

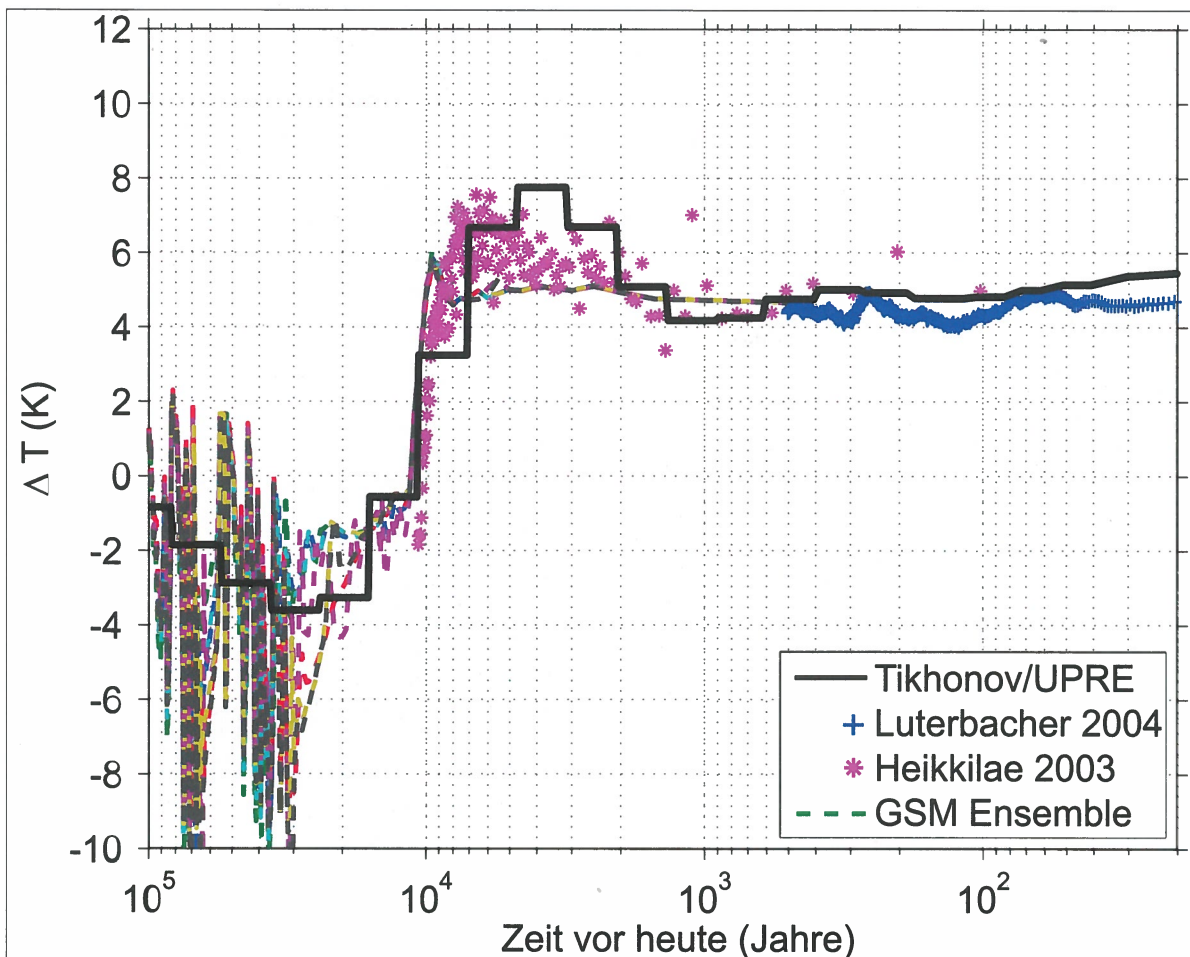


Abb. 6: Beispiel einer Paläotemperaturinversion. Es handelt sich hier um eine etwa 2 500 m tiefe Forschungsbohrung in Finnland (Outokumpu). Das umfassende geowissenschaftliche Messprogramm innerhalb der Bohrung und in ihrer Umgebung bietet hervorragende Bedingungen für Paläoklimauntersuchungen. Neben den Inversionsergebnissen sind hier noch eine regionale Proxyrekonstruktion (Heikkilä und Seppä 2003) und die europaweite Rekonstruktion von Luterbacher et al. (2004) zu sehen. Ebenfalls eingetragen wurden Bodentemperaturen aus einem Ensemble von Eisschildmodellen, die freundlicherweise von Lev Tarasov (Memorial University of Newfoundland, Canada) zur Verfügung gestellt wurden.

Luterbacher et al. (2004). Ebenfalls eingetragen wurden Bodentemperaturen aus einem Ensemble von Eisschildmodellen, die freundlicherweise von Lev Tarasov (Memorial University of Newfoundland) zur Verfügung gestellt wurden.

In diesem Fall stimmen die Ergebnisse aus allen genannten Quellen weitgehend überein. Das ist jedoch nicht immer der Fall. Im Folgenden sollen kurz einige Probleme angesprochen werden, welche die Rekonstruktion von vergangenen Temperaturänderungen oft erschweren. Hier ist zunächst ein praktisches, aber nichtsdestotrotz entscheidender Punkt zu nennen. Zwar gibt es fast überall Bohrungen, in denen Temperaturprofile aufgenommen werden können. Sie werden jedoch meistens mit einer nicht-wissenschaftlichen Zielsetzung abgeteuft – reine Forschungsbohrungen wie die im letzten Abschnitt vorgestellte sind sehr selten. Aus dieser Situation ergibt sich, dass nur sehr wenige der vorhandenen Bohrungen für eine Paläoklimaanalyse geeignet sind. Ziel der Bohrungen sind die Beobachtung und Gewinnung von Grundwasser, die Exploration von Minerallagerstätten und die Erschließung von Erdöl- oder Erdgaslagerstätten. In allen diesen Fällen sind die Betreiber

bestrebt, ihre Ziele schnell zu erreichen. Bohrungen bleiben selten lange genug ungenutzt, um ein thermisches Gleichgewicht mit dem Gestein zu erreichen. Die Nutzung von Grundwasser ist an Strömungsprozesse gebunden, die durch den damit verbundenen Wärmetransport eine Interpretation des Klimasignals oft unmöglich machen. Die zur verlässlichen Bestimmung notwendigen Parameter (Gesteinseigenschaften) werden wegen der damit verbundenen Kosten nur selten bestimmt. Auf Grund dieser Gegebenheiten stellt jede einzelne Paläoklimauntersuchung eine eigene Herausforderung dar.

Ein grundsätzliches Problem bei jedem Vergleich mit Daten unterschiedlicher Herkunft ist darin zu finden, dass sowohl Proxies als auch Klimamodelle nicht die relevante Bodentemperatur, sondern eine Temperatur der Atmosphäre liefern. Dies hängt naturgemäß von der zu Grunde liegenden Methode (zum Beispiel der Parametrisierung in Klimamodellen) ab. Die häufig gemessene Lufttemperatur (in 2 m Höhe) weicht von der Bodentemperatur oft um mehrere Grad ab. Hierbei spielen in erster Linie zwei Bedingungen eine Rolle: die Isolation der Erdoberfläche durch eine Schneedecke und die komplizierten mikroklimati-

schen Einflüsse der Vegetation. Da die untersuchten Bohrungen historisch meist in gemäßigten bis arktischen Breiten liegen, wurde vor allem der Effekt des Schnees untersucht.

Die erwähnte Differenz zwischen Luft- und Bodentemperatur wurde intensiv in der Meteorologie und besonders im Zusammenhang der klimatischen Entwicklung der Permafrostzone theoretisch und empirisch untersucht. Glücklicherweise kann für die Jahresmitteltemperatur auf der Basis zusätzlicher Untersuchungen und Daten eine einfache lineare Beziehung gefunden werden. Der Vegetationseffekt ist in Hinsicht auf die Interpretation von Bohrlochtemperaturen weit weniger bekannt und Gegenstand aktueller Forschungen. Beide genannten Effekte können sich im Verlauf der Klimaentwicklung ändern – dies stellt eine besondere Herausforderung dar.

Bei der Untersuchung von Klimaänderungen, die bis in den letzten glazialen Zyklus zurückreichen, muss in Betracht gezogen werden, dass die Erdoberfläche nicht immer im Kontakt mit der Atmosphäre war. In vielen Gebieten war die Erdoberfläche von dicken Eisdecken bedeckt, die relative Änderung des Meeresspiegels führte zu Transgressionen, zusätzlich existierten an den Rändern der Eisschilde glaziale Stauseen von beträchtlicher Größe. Alle diese Phänomene bringen besondere Temperaturbedingungen mit sich, die ihr Signal in der Untergrundtemperatur hinterlassen. In diesem Sinne handelt es sich kaum um Klima im engeren Sinne. Dies ist jedoch nicht nur eine zusätzliche Herausforderung, denn die Charakterisierung der Bedingungen an der Basis der Eisdecken ist selbst ein wichtiges und aktuelles Forschungsgebiet. Eisdecken zeigen an ihrer Basis oft Temperaturen in der Nähe des Schmelzpunktes, wodurch ein schnelles Gleiten in diesen Bereichen ermöglicht wird. Abhängig von den angenommenen Modellvorstellungen entstehen so ausgeprägte Fließmuster, die sich auch in geomorphologischen Indikatoren wiederfinden lassen. Simulationen des Einflusses von Eisdecken unterschiedlicher physikalischer Dynamik zeigen deutliche Unterschiede in den Tem-

peratursignalen im Untergrund (bis zu mehreren K) und weisen darauf hin, dass Bohrlochtemperaturen zum Verständnis der Prozesse an der Eisbasis beitragen können. **III**

LITERATUR

- Bodri, L. und V. Cermak (2007): Borehole climatology: a new method how to reconstruct climate. Oxford
- Davies, J.H. und D.R. Davies (2010): Earth's surface heat flux. *Solid Earth* 1, S. 5-24
- González-Rouco, J.F., H. Beltrami, E. Zorita und M.B. Stevens (2009): Borehole climatology: a discussion based on contributions from climate modeling. *Clim. Past* 5, S. 97-127
- Harris, R.N. und D.S. Chapman (2001): Mid-Latitude (30°-60° N) climatic warming inferred by combining borehole temperatures with surface air temperatures. *Geophys. Res. Lett.* 28, S. 747-750
- Heikkilä, M. und H. Seppä (2003): A 11,000 yr palaeotemperature reconstruction from the southern boreal zone in Finland. *Quaternary Science Reviews* 22, S. 541-554
- Hotchkiss, W. und L. Ingersoll (1934): Post-glacial time calculations from recent geothermal measurements in the Calumet copper mines. *Journal of Geology* 42, S. 113-142
- Lachenbruch, A.H., J.H. Sass, B.V. Marshall und T.H. Moses Douglas Jr. (1982): Permafrost, Heat Flow, and the Geothermal Regime at Prudhoe Bay, Alaska. *J. Geophys. Res.* 87, S. 9301-9316
- Luterbacher, J., D. Dietrich, E. Xoplaki, M. Grosjean, und H. Wanner (2004): European seasonal and annual temperature variability, trends and extremes since 1500. *Science* 303, S. 1499-1503
- Mottaghy, D., G. Schwamborn und V. Rath (2013): Past climate changes and permafrost depth at the Lake El'gygytyn site: implications from data and thermal modeling. *Climate of the Past* 9 (1), S. 119-133
- Pollack, H.N., S. Huang und P.Y. Shen (1998): Climate change record in subsurface temperatures: A global perspective. *Science* 282, S. 279-281

SUMMARY

Climate Data from the Underground?

by Volker Rath, Darius Mottaghy

The observation of recent borehole temperature profiles allow conclusion on changes of ground surface temperatures far back in time. Changes of surface temperatures diffuse into the subsurface, experiencing strong attenuation and phase shifts. For this reason we find the signature of the "Little Ice Age" in the first few hundreds of meters, while temperature anomalies originating from the post-glacial warming can be identified in deep boreholes. Past changes of surface temperatures can be reconstructed from these recent observations by mathematical methods. Fundamental problems of this approach are the fast decrease of resolution with backward time, and interpretational difficulties related to the complex heat and mass balance at the surface. Apart from contributing to the knowledge of past changes of atmospheric temperature, borehole temperature profiles also indicate conditions at the base of past ice sheets and thus help to improve our understanding of their dynamics.

AUTOREN

Dr. VOLKER RATH, geb. 1952
Dublin Institute for Advanced Studies, School of Cosmic Physics, 5 Merrion Square, Dublin 2 / IRLAND und Department of Earth Sciences, Astronomy and Astrophysics, Faculty of Physical Sciences, Universidad Complutense de Madrid, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid / SPANIEN
vrath@uscm.es

Dr. DARIUS MOTTAGHY, geb. 1974
Geophysica Beratungsgesellschaft mbH, Aachen, und Institute for Applied Geophysics and Geothermal Energy, E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen, Mathieustraße 10, 52074 Aachen
d.mottaghy@geophysica.de
www.geophysica.de